Perspectives sur la physique subatomique au Canada

2006-2016

RAPPORT DU COMITÉ
DE PLANIFICATION À
LONG TERME DU CRSNG

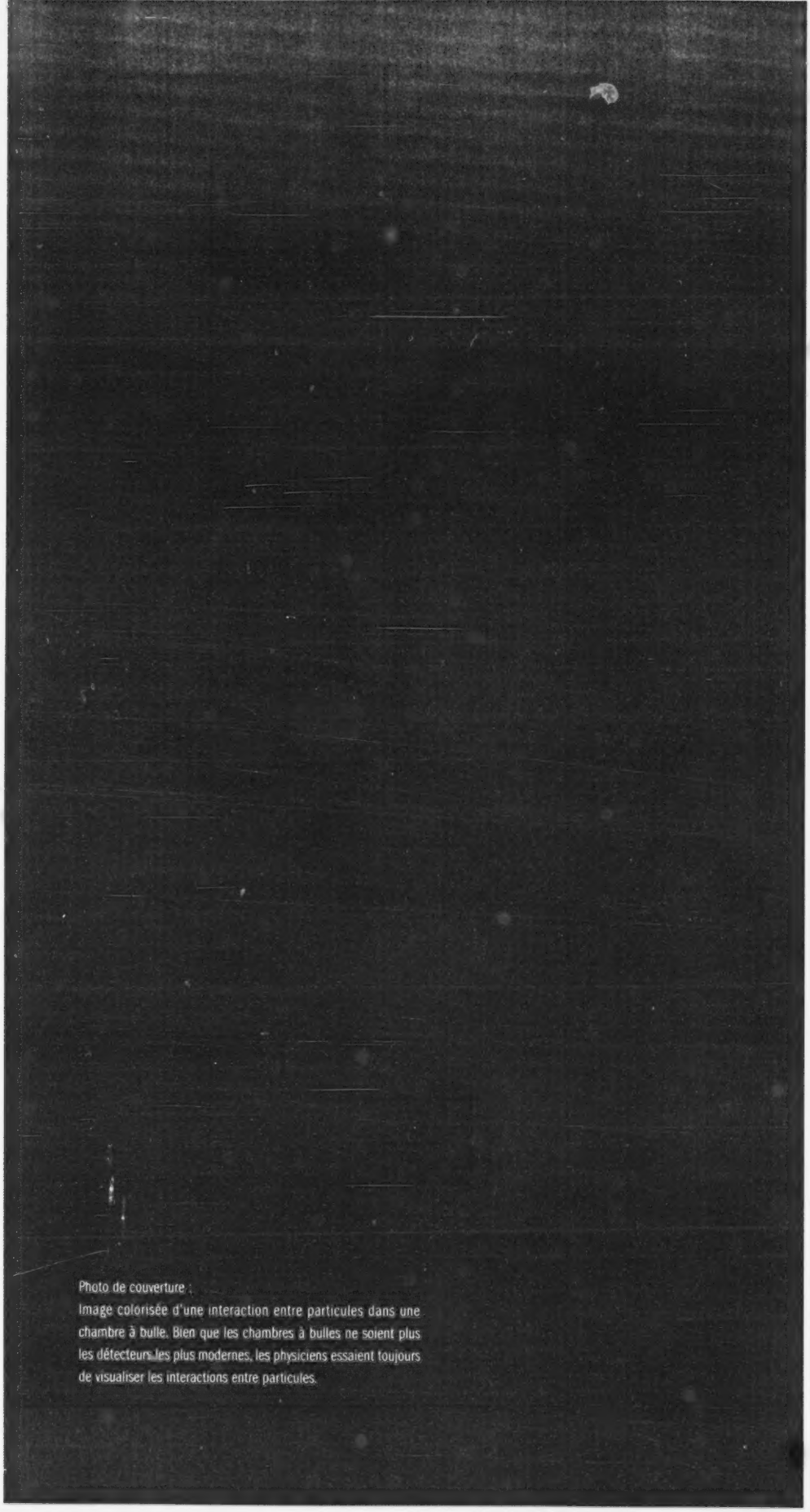


Photo de couverture :
Image colorisée d'une interaction entre particules dans une chambre à bulle. Bien que les chambres à bulles ne soient plus les détecteurs les plus modernes, les physiciens essaient toujours de visualiser les interactions entre particules.

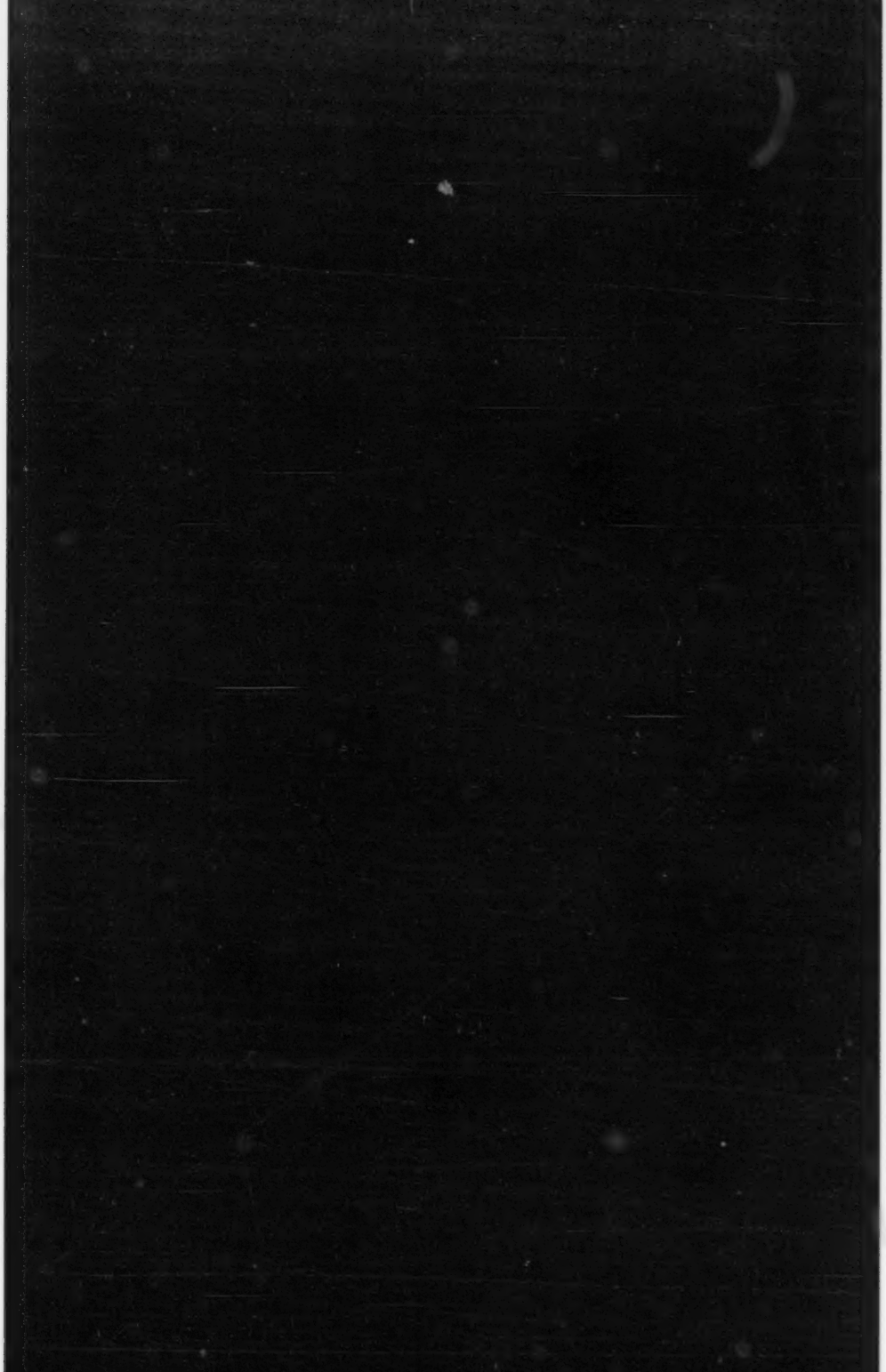


Photo de couverture :
Image colorisée d'une interaction entre particules dans une chambre à bulle. Bien que les chambres à bulles ne soient plus les détecteurs les plus modernes, les physiciens essaient toujours de visualiser les interactions entre particules.

Perspectives sur la physique subatomique au Canada

2006-2016

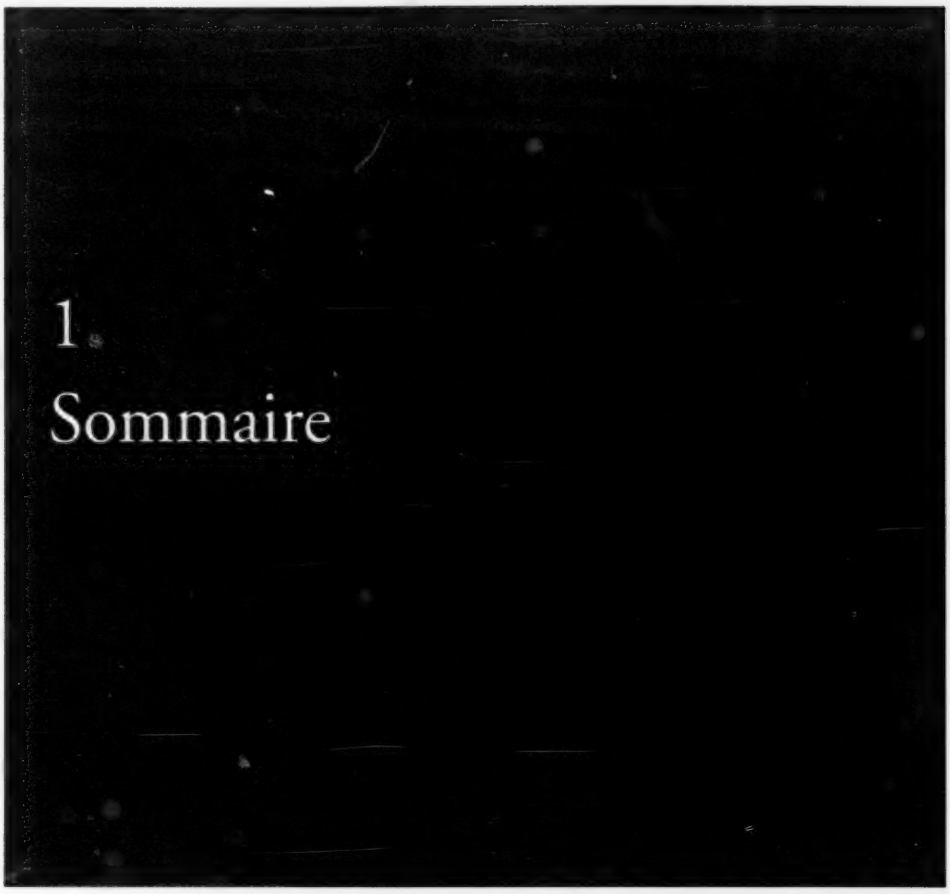
RAPPORT DU COMITÉ
DE PLANIFICATION À
LONG TERME DU CRSNG

This report is also available in English.

Droits d'auteur – Comité de planification à long terme de physique subatomique, 2006. Tous droits réservés. L'information contenue dans ce rapport peut être copiée sans permission à condition que les copies ne soient pas faites ou distribuées à titre commercial et que le titre et la date du rapport apparaissent sur les copies. Les propriétaires des illustrations conservent tous droits d'auteur.

Table des matières

1	**Sommaire**	2
2	**Les questions fondamentales que pose la physique subatomique**	7
2.1	S'attaquer aux questions fondamentales	8
3	**Science planétaire, atouts et vision canadiens**	16
3.1	Le contexte de la physique subatomique	16
3.2	La communauté canadienne de physique subatomique	20
3.3	Réalisations au cours des cinq dernières années	22
3.4	Notre vision de la recherche canadienne en physique subatomique	23
4	**Les questions fondamentales : Le programme canadien**	25
4.1	Situation actuelle de la physique subatomique	25
4.2	Physique des neutrinos	31
4.3	Études en astrophysique nucléaire	34
4.4	Études sur les structures nucléaires	36
4.5	Tests directs du modèle standard dans les collisionneurs	36
4.6	Tests indirects du modèle standard par des mesures précises	40
4.7	Chromodynamique quantique	43
4.8	Conséquences cosmologiques : recherche de la matière noire et théorie de cordes	46
4.9	Perspectives	48
5	**Les retombées économiques de la physique subatomique**	50
5.1	Retombées technologiques	50
5.2	Formation de personnel hautement qualifié	54
6	**Support for Subatomic Physics in Canada**	60
6.1	Aperçu	60
6.2	Appui financier à la physique subatomique	61
6.3	Installations, instituts et autres infrastructures d'appui à la physique subatomique	63
7	**Scénarios de financement et analyse**	70
7.1	Structure des tableaux budgétaires	71
7.2	Scénarios de financement	76
7.3	Activités du SNOLab	82
8	**Conclusion et sommaire des recommandations**	85
9	**Annexes**	89
9.1	Plan à long terme : mandat, procédure et Comité	89
9.2	Références	92
9.3	Glossaire	93



1. Sommaire

La physique subatomique est l'étude des constituants les plus élémentaires de la matière – de tout ce que nous voyons autour de nous. La curiosité qui est le moteur de ce champ de recherche est la même que celle de l'enfant qui s'amuse avec une loupe : De quoi les choses sont-elles faites? Comment tout cela tient-il ensemble? Comment fonctionnent-elles? D'où proviennent-elles?

Aujourd'hui, cette étude nous a conduit à une compréhension très détaillée, mais encore incomplète, des éléments dont nous sommes nous-mêmes formés et qui constituent le monde qui nous entoure. Nous comprenons leur comportement dans l'infiniment petit à une échelle de quelque 10^{-18} mètres, et nous savons que les phénomènes à cette échelle correspondent aux conditions qui régnaient dans l'Univers une fraction de seconde à peine après le Big Bang. Pour approfondir ces connaissances, le monde entier regroupe ses efforts dans des projets concertés, qui nous permettront dans les dix prochaines années de faire des percées spectaculaires dans notre compréhension de la nature – dont l'importance sera comparable à la révolution de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique. La science canadienne a joué un rôle déterminant dans cet effort et entend bien poursuivre dans la même voie.

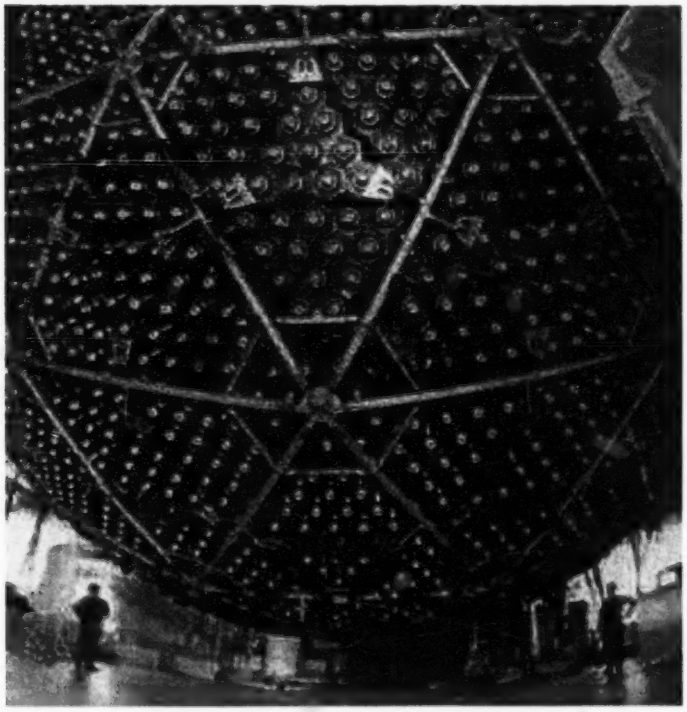
La physique subatomique est une aventure scientifique mondiale. Les énormes investissements que requièrent les accélérateurs et les détecteurs nécessaires pour faire des progrès dans ce domaine exigent des partenariats internationaux au sein desquels le Canada est un acteur majeur. Nous développons et gérons nos propres installations d'avant garde qui attirent des scientifiques étrangers et nous sommes des participants fort appréciés aux projets internationaux.

Le caractère international de la physique subatomique exige un effort mondial en vue d'une planification à long terme et de l'établissement de priorités. Au Canada, cette planification prend la forme de plans quinquennaux sous l'égide du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG). La communauté de la physique subatomique a mené plusieurs exercices de planification à long terme depuis le milieu des années 1990 pour recenser les projets qui méritent qu'on leur accorde la plus haute priorité, tant à l'étranger qu'au Canada. Le présent rapport rend compte du plus récent plan à long terme, qui couvre la période allant de 2006 à 2011, et explore la période allant de 2011 à 2016.

Le dernier plan quinquennal, qui remonte à 2001, mettait en évidence trois projets jugés hautement prioritaires et sur lesquels se concentrait la physique subatomique canadienne : l'expérience ATLAS, qui étudie les collisions protons protons aux plus hautes énergies disponibles sur Terre; le complexe d'accélérateurs ISAC du laboratoire TRIUMF à Vancouver, qui étudie les isotopes radioactifs à courte vie; et l'expérience de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO), qui étudie les neutrinos émis par le Soleil.

Au cours des cinq dernières années, la communauté scientifique canadienne a honoré ses engagements en livrant des résultats dans le cadre de ces trois projets :

- Au laboratoire TRIUMF, l'installation de faisceaux ioniques exotiques ISAC est opérationnelle et ISAC II est en construction. Il s'agit des installations de faisceaux radioactifs à plus fortes intensités et les plus perfectionnées du monde. Les études préliminaires ont résolu un problème que l'on se posait depuis longtemps touchant le taux de production de ^{22}Na dans des environnements astrophysiques explosifs, et nombre d'autres mesures sont en cours.



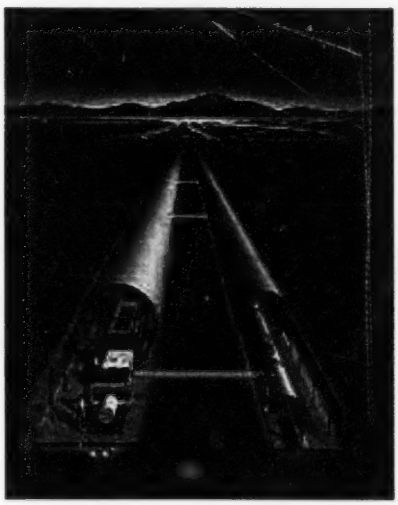
Le détecteur SNO avant que la caverne, près de 2 km sous terre près de Sudbury, ne soit remplie d'eau. Les résultats de l'expérience SNO sont l'une des plus importantes percées scientifiques des 10 dernières années, et ils représentent un succès majeur de la physique subatomique canadienne.

- L'expérience ATLAS au grand collisionneur de hadrons (LHC) est en cours de construction et les premières mesures auront lieu en 2007. La construction des composantes canadiennes du détecteur et de l'accélérateur a été terminée à temps et selon le budget. Les scientifiques canadiens jouent un rôle de premier plan dans l'installation du détecteur et l'élaboration des techniques d'analyse des données.
- L'expérience du SNO a indubitablement résolu le puzzle des neutrinos solaires en démontrant que le flux total de neutrinos du Soleil concorde avec les modèles solaires mais que les 2/3 de ces neutrinos changent d'identité au cours de leur voyage vers la Terre.

Ces réalisations, rendues possibles grâce à une aide financière venant à la fois du CRSNG et d'autres organismes, ont permis à la physique subatomique canadienne de se tailler une place de choix en ce début de siècle. Forte de cette assise, la communauté scientifique cherche maintenant à faire fond sur ces réalisations et à tirer parti de sa position enviable et des possibilités exceptionnelles qu'elle offre.

Après de vastes consultations auprès du milieu de la physique subatomique, le Comité de planification à long terme (ci-après le Comité) considère que les projets les plus prioritaires au cours de la période visée par le plan devraient être les suivants :

- exploitation intégrale de l'expérience ATLAS au LHC, explorant les collisions protons protons aux plus hautes énergies possibles;
- exploitation intégrale des faisceaux radioactifs de haute intensité pour la physique nucléaire et l'astrophysique nucléaire à ISAC et ISAC-II;
- achèvement et exploitation intégrale des installations du SNOLab, le meilleur laboratoire souterrain de grande profondeur du monde, y compris un financement d'immobilisations en vue d'une participation majeure aux expériences qui s'y dérouleront ;
- participation à un programme d'étude des oscillations de neutrinos sur longue distance, en particulier l'expérience T2K à l'installation japonaise J-PARC pendant les cinq premières années du plan;
- R et D vigoureuse en vue de la participation au collisionneur linéaire international (ILC), avec un financement des immobilisations en vue d'une participation majeure au cours de la période allant de 2011 à 2016.



Représentation artistique du futur collisionneur linéaire international, l'ILC (International Linear Collider), dans lequel des électrons et des positrons entreront en collision à une énergie dépassant les 500 GeV. L'ILC entrera en service au cours de la prochaine décennie.

En outre, le Comité recommande le maintien d'un programme étendu d'initiatives de plus petite envergure afin de soutenir la polyvalence et la diversité de la physique subatomique canadienne et de permettre d'exploiter les possibilités nouvelles et émergentes.

Un vigoureux effort expérimental doit être associé à des travaux théoriques. La théorie joue un rôle crucial en physique subatomique en proposant de nouvelles orientations pour les études expérimentales, en interprétant les nouveaux résultats expérimentaux et en les confrontant aux idées théoriques dans une compréhension approfondie de la nature. Il y a lieu de soutenir la solidité et la diversité des théoriciens canadiens.

Ce programme scientifique est exigeant sur le plan intellectuel et fascinant sur le plan scientifique, et il ne souffre aucune comparaison à l'échelle internationale. Il s'attaque aux questions scientifiques les plus cruciales du domaine. Les projets du programme en territoire canadien (SNOLab et ISAC) s'appuient sur les meilleures installations du monde et sur un leadership canadien de haute qualité.

Grâce à sa récente revitalisation par le renouvellement du corps professoral et des investissements provenant de l'extérieur du CRSNG, le milieu de la physique subatomique canadienne a tous les atouts en main pour mener ce programme. Malheureusement, rien ne garantit qu'il aura la capacité de le faire. Il y a un besoin urgent d'accroître les fonds de fonctionnement pour tirer parti des possibilités créées par ces investissements.

Au cours des dernières années, des organismes autres que le CRSNG ont injecté environ 75 millions de dollars en nouveau financement dans la physique subatomique. En règle générale, le coût d'exploitation des installations majeures pendant toute leur durée de vie équivaut au coût d'investissement. Toutefois, les fonds annuels fournis par le CRSNG à la physique subatomique n'ont progressé au cours des cinq dernières années que d'un million de dollars environ. De l'avis du Comité, cet élément constitue à l'heure actuelle le plus grand risque pour la discipline : en l'absence de nouveaux fonds de fonctionnement à un niveau suffisant pour permettre à la communauté canadienne de la physique subatomique, dynamique et en plein essor, de tirer parti des investissements récents en infrastructures, nous perdrons notre position de force et le potentiel de ces investissements ne sera pas pleinement exploité.

Le Comité recommande expressément :

- une solution urgente au problème immédiat que pose le manque de fonds de fonctionnement pour la nouvelle installation du SNOLab financée par la FCI;

- le doublement de l'enveloppe annuelle de physique du CRSNG pour la physique subatomique, qui passerait de 23 à 46 millions de dollars sur une période de dix ans et offrirait au cours de cette période un nouveau financement de 100 millions de dollars à la discipline.

Enfin, compte tenu du rôle central joué par le laboratoire TRIUMF dans la physique subatomique canadienne, et de l'importance de l'infrastructure technique universitaire pour le milieu, le Comité formule les deux recommandations stratégiques suivantes :

- Il y a lieu de favoriser et de renforcer le rôle central du laboratoire TRIUMF qui constitue l'infrastructure et le pivot de la physique subatomique au Canada, en accordant une attention particulière à la transparence du processus budgétaire fédéral, et à la façon dont le budget reflète le mandat de TRIUMF et le plan quinquennal. Pour mener à bien sa mission, TRIUMF devrait être en mesure d'avoir accès à tous les organismes de financement pertinents de la physique subatomique, y compris la FCI.

- Il y a lieu de se pencher étroitement sur les lignes directrices du CRSNG relatives à l'infrastructure pour faire en sorte que l'infrastructure de la physique subatomique continue à être admissible au financement, et de veiller à ce que l'infrastructure soit gérée de façon à garantir l'accès sans entrave du milieu canadien de la physique subatomique dans son ensemble.

Les cinq à dix prochaines années seront tout à fait passionnantes pour la physique subatomique canadienne. Nous sommes des acteurs de premier plan selon tous les axes que nous privilégions, et qui touchent des questions scientifiques importantes à l'échelle mondiale. Le Comité est convaincu que ce potentiel peut être pleinement réalisé avec la mise en place d'une stratégie cohérente de la part des organismes subventionnaires et des gouvernements pour assurer un financement à un niveau nettement supérieur à celui que donne à l'heure actuelle le CRSNG et correspondant davantage au niveau total récemment accordé.

Guide du lecteur

La structure du rapport est la suivante. La section 2 résume les grands enjeux scientifiques en physique subatomique.

La section 3 explique le contexte – à la fois canadien et mondial – où évolue cette science, décrit le milieu canadien de la physique subatomique, y compris ses données démographiques et ses succès récents, et définit la vision du Comité pour l'évolution du milieu au cours de la durée de ce plan.

La section 4 **donne une description plus technique des principaux thèmes de recherche** qui mobilisent à l'heure actuelle le milieu canadien de la physique subatomique.

La section 5 porte sur l'incidence économique de la physique subatomique au Canada, en s'attachant particulièrement à la formation de personnes hautement qualifiées.

La section 6 explique **la complexité du financement et du soutien de la physique subatomique** par une analyse des nombreux organismes et établissements différents qui œuvrent en physique subatomique au Canada.

La section 7 analyse en détail les scénarios de financement du CRSNG qui ont été soumis à la réflexion du Comité de planification à long terme.

La section 8 renferme les conclusions ainsi que les recommandations détaillées du Comité.

Regroupées, les sections 2, 3, 5 et 8 donnent **un aperçu non technique** de ce document à caractère scientifique.

Enfin, la section 9 renferme des renseignements supplémentaires, une bibliographie et un glossaire.

2
les questions fondamentales que pose la physique subatomique

Nous vivons à une époque fascinante. Les récentes découvertes indiquent qu'à peu près 95 % de l'Univers est constitué de matière et d'énergie sous des formes qui nous sont complètement inconnues et les avancées théoriques nous annoncent un monde entièrement nouveau de particules qui devraient être découvertes au cours de la prochaine étape, à des énergies jamais atteintes jusqu'à présent. Les scientifiques sont à la veille de faire des percées majeures qui révolutionneront notre conception de l'Univers et de ses composantes. C'est pourquoi de nombreuses études internationales sont en cours pour répondre aux questions de physique subatomique les plus urgentes de l'heure. Les questions cruciales que l'on retrouve régulièrement dans ces études sont les suivantes :

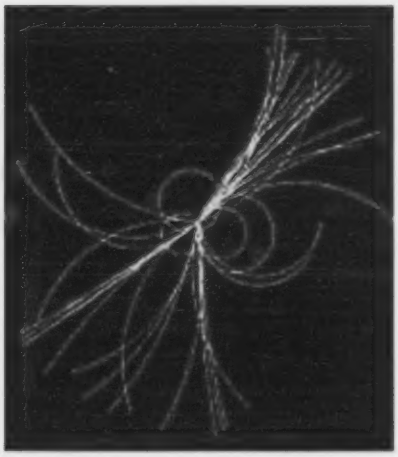
- Quelle est la nature des nouvelles particules et de la physique au-delà du modèle standard? Peut-on élaborer une théorie de grande unification englobant la gravité et les particules?
- Comment les particules acquièrent-elles une masse? Le boson de Higgs existe-t-il vraiment et donne-t-il les masses, ou a-t-on besoin d'une nouvelle physique?
- Quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire qui constituent 95 % de l'Univers?
- Quelle est l'origine de l'Univers? Comment évolue-t-il? Quelle est la cause de l'asymétrie qui fait que l'Univers est maintenant dominé par la matière plutôt que par l'antimatière?
- Quelles sont les masses des neutrinos et comment ces particules ont-elles façonné l'évolution de l'Univers?
- La théorie du confinement des quarks et des gluons peut-elle décrire quantitativement les propriétés précises des hadrons?
- Quels sont les mécanismes responsables de la synthèse des éléments lourds?

La physique subatomique canadienne fait de grands progrès en s'attachant à répondre à ces profondes questions, tant sur le front expérimental que théorique. Cette recherche requiert des équipements et des installations ultraperfectionnés ainsi qu'un effort concerté à l'échelle internationale, notamment la collaboration entre la physique nucléaire et la physique des particules, l'astrophysique des particules, la cosmologie et l'astronomie.

2.1 S'attaquer aux questions fondamentales

La réponse à ces questions fondamentales nécessite l'observation et la compréhension théorique des processus de la nouvelle physique. Les laboratoires de recherche partout dans le monde exploreront cette nouvelle physique selon divers axes, chacun s'attaquant à plusieurs aspects des questions fondamentales susmentionnées. De nouveaux accélérateurs à haute énergie comme le grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN et le futur collisionneur linéaire international (ILC) sont censés découvrir de nouvelles particules lourdes à la « frontière des hautes énergies ». En revanche, la compréhension fine de phénomènes subtils et rares est la raison d'être des expériences à la « frontière de la précision ». Le développement d'installations de faisceaux radioactifs comme ISAC à TRIUMF constitue une avancée majeure pour explorer les processus de la physique nucléaire. En effet, on y crée des faisceaux « sur mesure » ouvrant des possibilités nouvelles puisqu'on peut produire, accélérer et étudier une large gamme d'isotopes riches en protons ou en neutrons. La nécessité de détecter des interactions très rares dans un contexte où s'affrontent la radioactivité naturelle et les rayons cosmiques est une caractéristique commune des divers travaux en astrophysique des particules. C'est pourquoi les détecteurs doivent avoir des niveaux de radioactivité extrêmement faibles et être protégés dans des laboratoires souterrains à de grandes profondeurs dans un milieu stérile, comme l'Observatoire de neutrinos de Sudbury. Enfin, il est essentiel de coupler étroitement la physique théorique et la physique expérimentale pour s'attaquer à ces questions fondamentales.

Dans les sections suivantes, nous nous intéressons aux différents aspects de ces questions fondamentales. Dans de nombreux cas, plusieurs de ces questions sont abordées ou effleurées par une démarche unique.



Simulation de particules émergeant de la désintégration d'une particule de Higgs, à la suite d'une interaction à haute énergie entre électrons et positrons.

Représentation fantaisiste des nouvelles idées en physique théorique des particules.

Que nous réserve la nouvelle physique au-delà de la théorie du modèle standard?

La théorie actuelle de la physique subatomique porte le nom de modèle standard. Elle a été confirmée avec force en 1983 lors de la découverte de deux nouvelles particules, les bosons *W* et *Z*, dont la masse et les autres propriétés étaient prédites avec précision par le modèle. Par la suite, le modèle standard a fait l'objet d'une foule d'études et aucun écart important n'a été constaté. Il nous a permis de décrire avec un succès extraordinaire le monde subatomique dans le cadre d'une théorie mathématique entièrement cohérente.

Toutefois, le modèle standard renferme de nombreux paramètres physiques apparemment arbitraires. L'observation des oscillations de neutrinos par l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO) a révélé que les neutrinos avaient des masses non nulles, mais beaucoup plus petites que les autres particules, nécessitant peut être une physique au-delà du modèle standard. En outre, de plus en plus de données nous indiquent que la matière noire est formée de particules qu'on ne trouve pas dans le modèle standard. Selon les hypothèses, il faut une théorie plus générale « au-delà du modèle standard » et comblant les lacunes de cette théorie pour décrire exactement la nature.

Selon le modèle standard, les particules *W* et *Z* acquièrent leur masse par brisure de symétrie. Pour se manifester, cette brisure de symétrie requiert, selon une interprétation simple du modèle, l'existence d'une particule actuellement non observée appelée le boson de Higgs. Les données obtenues à ce jour privilégient un boson de Higgs de faible masse que l'on devrait pouvoir observer grâce au LHC. Toutefois, il y a des incohérences théoriques dans cette description simple de la production de masse et, si un léger boson de Higgs est observé, tout porte à croire qu'il fera partie d'une théorie plus complète, notamment la supersymétrie. Si la supersymétrie existe, de nombreuses autres particules devraient être découvertes par le LHC. Si l'on n'observe pas le boson de Higgs, un autre mécanisme quelconque au-delà de la physique du modèle standard doit être responsable de la brisure de symétrie, lequel mènerait également à une nouvelle dynamique aux échelles d'énergies accessibles au LHC. Quelle qu'en soit l'issue, ces scénarios devraient déboucher sur une nouvelle physique au-delà du modèle standard. La compréhension du mécanisme responsable de l'origine de la masse et l'avènement d'une nouvelle physique au-delà du modèle standard constituent les principaux objectifs du programme expérimental du LHC.

Les expériences de physique nucléaire à énergies faibles et intermédiaires ont également un rôle à jouer dans la recherche d'une physique au-delà du modèle standard. Choisis avec soin, les noyaux constituent un « laboratoire quantique » permettant de mesurer avec une haute précision les observables du modèle standard et de rechercher des phénomènes cachés ou supprimés par le modèle standard. Par exemple, l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers peut être expliquée en termes d'asymétrie de l'inversion du temps qui pourrait être observée à ISAC par les expériences qui explorent des systèmes nucléaires spécialement choisis.

On assiste également à un effort considérable pour formuler de nouvelles théories décrivant la nature de la physique au-delà du modèle standard. On parle ici notamment de la supersymétrie, des modèles avec des dimensions supplémentaires de l'espace-temps et des théories des cordes. Ces dernières sont particulièrement intéressantes dans la perspective d'une théorie de grande unification puisqu'elles intègrent la gravité quantique aux éléments du modèle standard.

La matière noire : Quel est le principal constituant de masse dans l'Univers?

Des données de plus en plus précises sur la non uniformité de la radiation produite dans l'Univers primordial (le rayonnement de fond diffus cosmologique), les profils de vitesse des galaxies en rotation et l'observation de supernovæ lointaines nous ont livré une information très détaillée sur la composition et la masse de l'Univers qui nous a amenés à prendre conscience d'un fait surprenant, à savoir qu'à peu près 95 % de l'énergie de l'Univers nous est complètement inconnue. Les mesures actuelles révèlent qu'environ 25 % de cette énergie est constituée de « matière noire » non lumineuse, contenue principalement dans les grands halos qui entourent les galaxies. La matière que nous voyons (étoiles, planètes, etc.) ne représente qu'environ 1 % et les gaz interstellaires environ 4 %. Le reste, soit 70 %, semble être sous forme d'énergie noire, qui se comporte comme une force gravitationnelle répulsive et qui est responsable de l'expansion de l'Univers à un rythme toujours croissant.

Certains progrès ont déjà été réalisés au sujet de la matière noire. Selon un large consensus, il s'agirait de particules massives interagissant très faiblement (ou WIMPS, acronyme de l'anglais Weakly Interacting Massive Particules) qui dérivent lentement à travers la galaxie. La Terre passe à travers ce tourbillon de WIMPS et l'on peut espérer que les projets expérimentaux actuellement en cours d'élaboration nous permettront d'observer la matière noire dans les années à venir.

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les théories de supersymétrie prédisent l'existence de nombreuses particules nouvelles qui peuvent être observables au LHC. L'une des conséquences de ces théories est qu'elles renferment naturellement une particule supersymétrique ultralégère. Si elle est stable, cette particule pourrait bien rendre compte de la matière manquante de l'Univers. Il est tout à fait fascinant qu'un candidat à la matière noire découle naturellement des développements théoriques généraux en physique subatomique et ne nécessite pas de théorie spéciale pour expliquer son existence.

La recherche de la matière noire est un exemple de premier ordre de la synergie en physique subatomique. De nombreux programmes expérimentaux sont en cours pour détecter la matière noire directement, mais ils ne seront pas en mesure

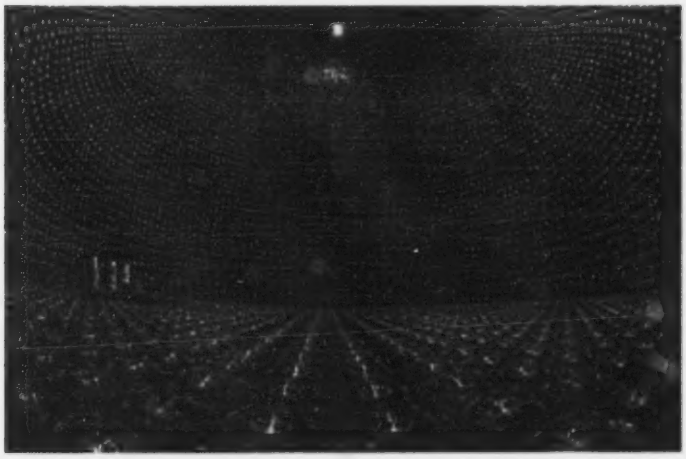
d'analyser la nature supersymétrique des particules qu'ils observeront. En revanche, s'il existe des particules supersymétriques, elles devraient pouvoir être observées au LHC où la mesure de leur production et de leur mode de désintégration les identifiera comme étant de nature supersymétrique. Encore là, les recherches avec les accélérateurs ne permettront pas d'identifier ces particules comme étant de la matière noire. Par conséquent, les deux types de recherche seront nécessaires pour montrer de façon concluante que la matière noire est supersymétrique.

La matière noire peut également être observée indirectement. Les WIMPS qui se dispersent dans des corps massifs comme la Terre ou le Soleil peuvent être liés par gravitation au centre de ces objets où ils seraient suffisamment nombreux pour que leur annihilation produise un flux de rayons gamma à haute énergie ou de neutrinos observables par des instruments terrestres. Les résultats de tous ces programmes – recherches portant directement sur la matière noire, nouveaux accélérateurs et recherches sur l'annihilation de la matière noire – aideront à élucider la nature de la matière noire et la supersymétrie. Leur détection serait une percée phénoménale.

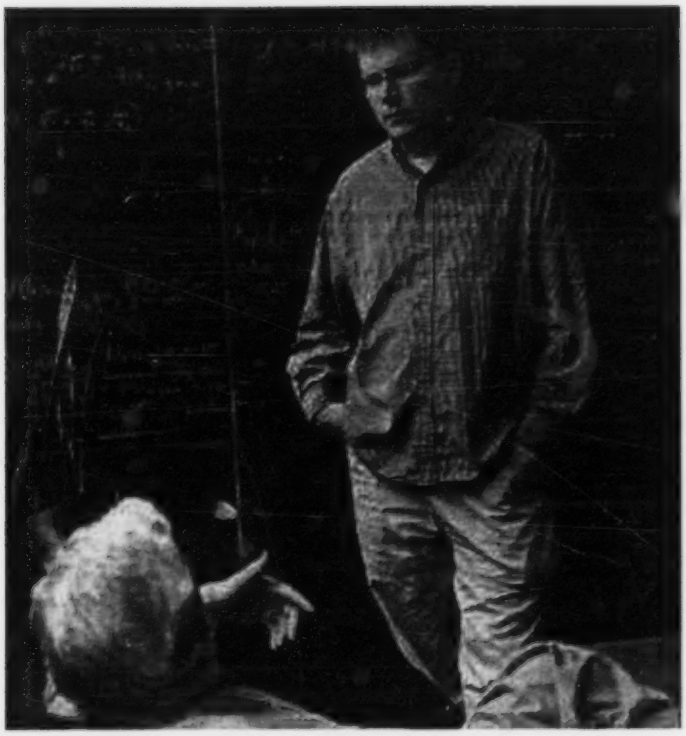
L'énigmatique neutrino : Comment a-t-il façonné la structure et l'évolution de l'Univers?

La découverte des oscillations de neutrinos par le SNO et l'expérience japonaise de Super-Kamiokande implique que les neutrinos ont une masse, qui peut être petite mais non nulle. Cette observation ouvre de nouveaux horizons quant au rôle des neutrinos dans la structure et la formation de l'Univers.

Une des hypothèses est que les neutrinos massifs pourraient être reliés à l'asymétrie matière-antimatière observée dans l'Univers. Nous vivons dans un Univers dominé par la matière et nous nous demandons comment cela s'est produit. C'est l'une des questions les plus fondamentales et l'on explique cet état de chose par la violation de la symétrie CP, laquelle décrit comment les lois physiques devraient être invariantes sous conjugaison de charge (C – échange de particules et d'antiparticules) et sous parité (P – échange de coordonnées spatiales).



Le détecteur de neutrinos SuperKamiokande au Japon. Les détecteurs SuperK et SNO ont, ensemble, obtenu des résultats d'une immense portée pour notre compréhension du comportement des neutrinos.



Physiciens théoriciens à l'Institut Perimeter, à Waterloo (Ontario).

La violation de symétrie CP mesurée dans le secteur des quarks est très petite et n'est pas suffisante pour rendre compte de l'asymétrie matière-antimatière observée. La violation de CP dans le secteur des neutrinos reste encore à mesurer, mais pourrait en fin de compte être à l'origine de l'asymétrie observée. La compréhension de ce phénomène grâce à un programme d'étude des oscillations de neutrinos sur longue distance est par conséquent essentielle pour comprendre l'Univers primordial et la présence de matière en son sein.

Il est capital de comprendre l'origine de la masse des neutrinos et de déterminer si le neutrino constitue sa propre antiparticule (neutrino de Majorana). Les neutrinos de Majorana sont privilégiés dans la plupart des théories étant donné que le mécanisme qui produit la masse des neutrinos est assez naturel et pourrait être associé à une large phase de violation de CP. Les expériences de double désintégration ß sans émission de neutrinos sont essentielles pour mesurer la masse absolue des neutrinos, déterminer s'il s'agit de particules de Majorana et, par conséquent, conclure si la violation de CP dans le secteur des neutrinos est une réelle possibilité. La connaissance de la masse des neutrinos aidera également à comprendre leur influence gravitationnelle sur la formation des structures à grande échelle et l'évolution de l'Univers primordial.

L'Observatoire de neutrinos de Sudbury a démontré avec brio que les neutrinos solaires oscillent. De nombreux scientifiques pensent que ces oscillations sont provoquées par des interactions avec la matière dans le Soleil. Toutefois, l'expérience ne peut déterminer le mécanisme exact qui est à l'origine des oscillations, et d'autres mécanismes, y compris une nouvelle physique prévoyant des interactions avec des neutrinos de masse variable, ont été proposés. Les études portant sur les neutrinos solaires à faibles énergies seront en mesure d'explorer l'origine de ces oscillations.

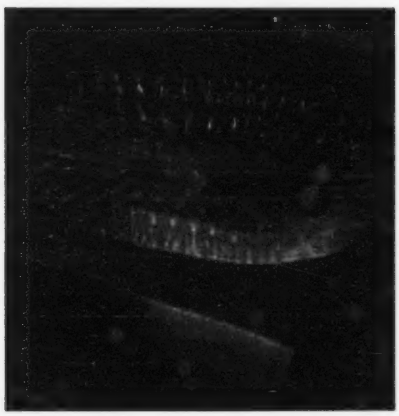
Le neutrino est également un excellent outil pour sonder d'autres processus d'astrophysique. Contrairement aux rayons gamma qui prennent des millions d'années pour se diffuser du noyau du Soleil jusqu'à sa surface, les neutrinos arrivent directement à la surface du Soleil et par conséquent sont porteurs d'information sur les processus nucléaires qui se produisent dans le noyau. De même, la production de neutrinos nous révèle des phénomènes qui surviennent dans les supernovæ et d'autres environnements à hautes énergies.

Le monde des quarks et des gluons : Comment leur confinement explique-t-il les états fondamentaux de la matière?

Dans le modèle standard, les interactions entre les quarks (qui ont une masse) et les gluons (qui en sont dépourvus) sont décrites par une théorie appelée chromodynamique quantique (CDQ). Les quarks et les gluons s'assemblent pour former les protons et les neutrons, que l'on connaît bien, de même que d'autres hadrons, mais les détails de la CDQ demeurent encore mal connus.

Mais pourquoi doit-on élucider ce problème? Considérons la masse de la matière ordinaire. La masse des atomes est concentrée dans leur noyau. Les électrons qui les entourent sont d'une importance cruciale pour déterminer comment les atomes interagissent entre eux, mais ils constituent moins d'une partie de un millième de la masse. Les noyaux sont formés de protons et de neutrons, lesquels sont eux mêmes constitués de quarks et de gluons. Par conséquent, la plus grande partie de la masse de la matière est en fin de compte attribuable aux quarks et aux gluons décrits par la CDQ. Or, des calculs réalistes indiquent que la contribution de la masse des quarks à la masse du noyau est fort petite, si bien qu'ils ne représentent qu'un petit pourcentage de la masse totale de protons. En conséquence, 95 % de la masse du proton (ou du neutron) et donc 95 % de la masse de la matière ordinaire émerge des interactions des quarks avec les gluons de masse nulle. On n'a pas pour l'instant d'explication précise de ce phénomène.

Bien que la chromodynamique quantique soit maintenant fermement établie comme théorie fondamentale de l'interaction forte entre quarks et gluons, nos connaissances sont lacunaires à maints égards. Dans les interactions à courte distance (à haute énergie), l'interaction est relativement faible, si bien que l'on peut faire appel aux méthodes mathématiques pour résoudre une partie de la théorie. En revanche, dans les interactions à basse énergie (sur de longues distances), on découvre que les quarks et les gluons interagissent entre eux avec une force excessive, qui conduit à leur confinement et à la formation des particules élémentaires de la matière ordinaire : les protons et les neutrons. Les calculs quantitatifs en CDQ dans ce régime demeurent l'un des plus grands défis intellectuels de la physique.



Représentation visuelle du stockage de l'énergie dans un méson lourd, obtenue par simulations numériques (CDQ sur réseau). La structure entre la paire quark-antiquark est un « tube de flux » de couleurs représentant le champ gluonique. Les progrès dans les techniques de calcul en CDQ sur réseau rendent de plus en plus possible ce type de visualisation détaillée.

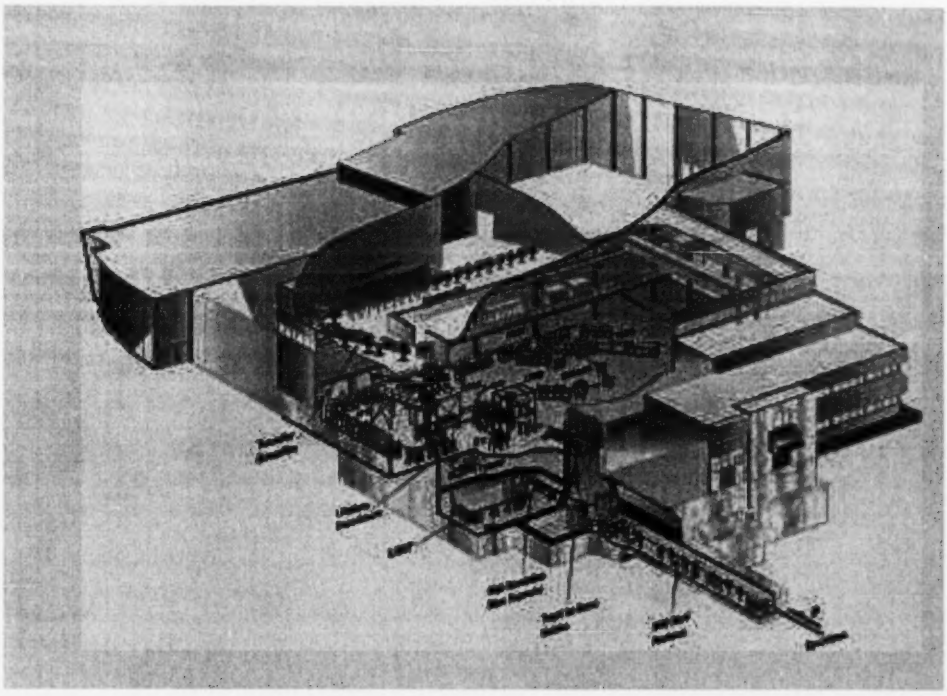
Or, ce défi est actuellement relevé. Les techniques de modélisation qui avaient cours depuis des décennies ont récemment été remplacées par des méthodes théoriques rigoureuses, et la communauté internationale développe des centres de calcul, certains parmi les plus puissants de la planète, voués exclusivement à la solution numérique des problèmes de CDQ. Conjugués avec les avancées dans les théories des champs effectifs et les données précises des expériences, cette approche devrait révolutionner le domaine. On a progressé dans la compréhension détaillée de la structure des protons, des neutrons et des autres hadrons. En outre, la CDQ prédit des états exotiques de la matière, tels les hybrides et les « boules de gluons », qui n'ont jamais été observés de manière non-ambiguë. Des recherches expérimentales sur ces états exotiques auront probablement lieu au cours de la période visée par le plan à long terme et leur découverte pourrait vérifier l'exactitude de la CDQ en tant que théorie décrivant le monde réel.

Structure nucléaire et astrophysique nucléaire : Comment et où les éléments lourds sont-ils produits?

Le noyau renferme plus de 99,9 % de la masse de l'atome et, par conséquent, de la matière ordinaire de l'Univers. C'est un système complexe de mécanique quantique à N corps et sa compréhension est fondamentale si l'on veut comprendre comment l'Univers a évolué et comment les éléments sont produits.

La physique nucléaire a fait de formidables progrès ces dernières années grâce aux installations qui produisent des isotopes avec des rapports neutron-proton précis permettant l'exploration des rouages internes de ces systèmes complexes à N corps. Ce réarrangement contrôlé des constituants du noyau a mené à la découverte de nouvelles formes de matière nucléaire et nous a également donné accès à des noyaux qui jouent un rôle clé dans la formation des éléments de l'Univers. En règle générale, les études de la structure nucléaire et de l'astrophysique nucléaire s'attachent à élucider l'origine, la composition, la structure et l'évolution des noyaux atomiques ainsi que leur rôle dans les systèmes astrophysiques. L'élaboration d'une théorie unifiée des noyaux atomiques qui pourrait prédire à la fois les structures de noyaux non encore découverts et leur rôle dans les phénomènes astrophysiques est l'ambition scientifique à long terme des chercheurs du monde entier qui étudient la structure nucléaire et l'astrophysique nucléaire.

Les propriétés des noyaux atomiques sont essentielles pour déterminer la structure et l'évolution du cosmos. Seuls les éléments les plus légers (hydrogène, hélium et lithium) ont été créés lors du Big Bang. Tous les éléments plus lourds ont été synthétisés par suite de réactions nucléaires dans les étoiles ordinaires, les novæ, les sursauts de rayons X, les supernovæ et d'autres environnements astrophysiques. Les réactions de synthèse des éléments impliquent de nombreux noyaux exotiques instables qui n'existent que dans les conditions de température et de pression extrêmes observées dans les étoiles et les supernovæ. Avec l'avènement d'installations de faisceaux radioactifs comme ISAC, il est maintenant possible de produire ces noyaux en laboratoire et d'étudier leur évolution et leur synthèse de manière



Représentation schématique des installations de faisceaux d'ions radioactifs ISAC-I (à l'avant-plan) et ISAC-II (à l'arrière-plan), au laboratoire TRIUMF, à Vancouver (Colombie-Britannique). Le faisceau de protons provenant du principal cyclotron de TRIUMF pénètre dans le coin droit inférieur.

contrôlée. Il est essentiel que nous puissions déterminer les propriétés de ces noyaux pour comprendre les temps caractéristiques et les énergies libérées lors de ces événements astrophysiques explosifs qui produisent les éléments pour ensuite les éjecter comme cendres qui s'agglutineront par la suite pour former de nouvelles étoiles et des planètes comme la Terre et toute la vie qu'elle abrite.

Globalement, le Comité est convaincu que des découvertes passionnantes et fondamentales seront faites au cours de la période visée par la planification à long terme. Il est possible que ces découvertes transforment notre compréhension de l'origine de la matière et de l'énergie et nous donnent une image différente de l'évolution de l'Univers. Le Canada est bien placé pour être un chef de file mondial sur ce front avec un véritable leadership et une participation active dans les domaines de recherche les plus essentiels. Les synergies observées au Canada, entre à la fois la physique théorique et la physique nucléaire expérimentale, la physique des particules et l'astrophysique, confèrent à la recherche subatomique une approche saine et équilibrée. Fort d'un appui sans réserve, le Canada sera un chef de file dans ce qui peut être l'équivalent de la Renaissance dans le monde scientifique.

3
Science planétaire, atouts et vision canadiens

La communauté internationale de la physique subatomique est parvenue à un consensus sur les plus importantes questions scientifiques et sur les moyens de s'y attaquer. Les scientifiques canadiens et la science canadienne ont participé à cette réflexion et à ce consensus et leurs recherches s'articulent autour du programme présenté ici. La présente section décrit ce contexte, livre une brève introduction du milieu canadien de la physique subatomique et de ses récents succès et articule une vision de son avenir qui s'appuie sur ses points forts, ses capacités et ses réalisations.

3.1 Le contexte de la physique subatomique

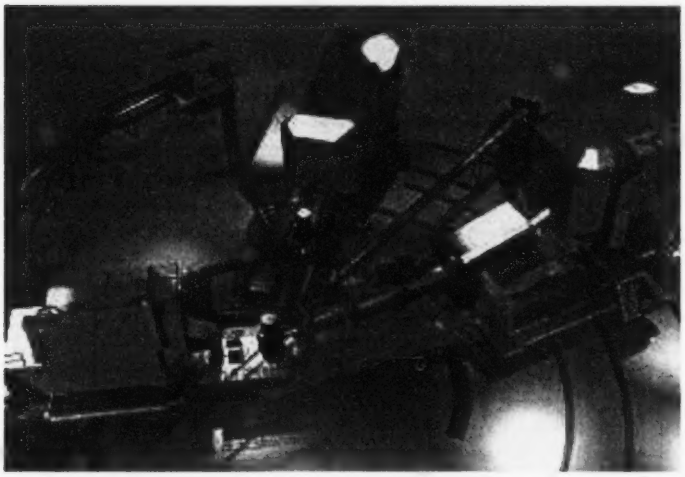
Les machines et le capital humain requis pour s'attaquer aux questions fondamentales de la physique subatomique sont à une telle échelle que cette discipline est une science véritablement planétaire. Aucun pays ne peut se permettre de mener seul l'ensemble des expériences de physique subatomique pertinentes et un réseau mondial de laboratoires a vu le jour, lequel assure une couverture étendue et des mesures complémentaires. Ce réseau international de laboratoires et d'installations est au cœur des projets collectifs de physique subatomique planétaire. Les laboratoires abritent à la fois des accélérateurs et l'infrastructure locale indispensable à l'appui des universitaires qui en sont les utilisateurs. Le Canada possède deux laboratoires de ce genre (TRIUMF et SNOLab) et il fait de solides contributions aux expériences des laboratoires internationaux.

La physique subatomique internationale est un effort bien coordonné. Elle est dotée de plusieurs organismes de surveillance et régie par différents exercices de planification, qui tous sont mus par les questions scientifiques prégnantes de notre domaine, et sont appuyés par des technologies de pointe et des idées prospectives garantes à la fois des avancées théoriques et expérimentales. Les physiciens subatomiques canadiens travaillent collectivement avec nos partenaires internationaux à la planification et à la réalisation de projets dans leur domaine.

Les chercheurs universitaires jouent un rôle unique et central dans la recherche en physique subatomique, même si les expériences sont dans l'ensemble de trop grande envergure pour être du ressort d'une seule université. Les groupes universitaires proposent des expériences, ils conçoivent, élaborent et construisent les composantes des détecteurs, participent à la saisie de données et dirigent des analyses physiques. Les membres du corps professoral sont au cœur du programme expérimental de la physique subatomique, à la fois parce qu'ils dirigent les expériences et parce que les universités sont au cœur du recrutement et de la formation théorique et expérimentale des étudiants et d'autres membres du personnel hautement qualifié dont l'importance est si grande pour le succès de notre science.

Les installations en place

Le laboratoire TRIUMF à Vancouver, qui a ouvert ses portes en 1974, est le laboratoire national du Canada en physique des particules et en physique nucléaire. À l'heure actuelle, son programme phare, l'installation de faisceaux radioactifs ISAC, est à la fine pointe mondiale pour la production d'isotopes exotiques de courte vie. Les capacités uniques d'ISAC permettent des mesures critiques et extrêmement exigeantes qui ont déjà fait d'importantes contributions à notre compréhension des processus nucléaires au cœur des étoiles et du mécanisme qui produit les éléments lourds de l'Univers. En outre, ISAC permet de tester de manière exceptionnelle le modèle standard de l'interaction faible et d'explorer les nouvelles formes de structures nucléaires. Ces travaux se poursuivront à ISAC II, qui pourra sonder les structures de noyaux exotiques d'une importance capitale pour notre compréhension des environnements hautement énergétiques en astrophysique comme ceux des novæ, des supernovæ et des explosions de rayons gamma.



Représentation schématique d'un système de spectromètres proposé pour le hall C du Jefferson Laboratory, en Virginie. Aux extrémités droite et gauche se trouvent les spectromètres magnétiques HMS de 7 GeV/c et SOS de 1,6 GeV/c; au centre se trouve le spectromètre SHMS de 12 GeV/c, dont la construction est proposée dans le cadre du projet visant à faire passer le JLab à une énergie de 12 GeV.

TRIUMF joue également un rôle important en tant qu'infrastructure pour les Canadiens qui participent à des expériences internationales majeures comme l'expérience ATLAS au CERN et l'expérience T2K des oscillations de neutrinos sur longue distance au Japon. L'expertise concentrée à TRIUMF dans les domaines de la physique des accélérateurs et de la R et D des détecteurs a permis au Canada de faire d'importantes contributions « en nature » à ces projets et aux accélérateurs qui les rendent possibles.

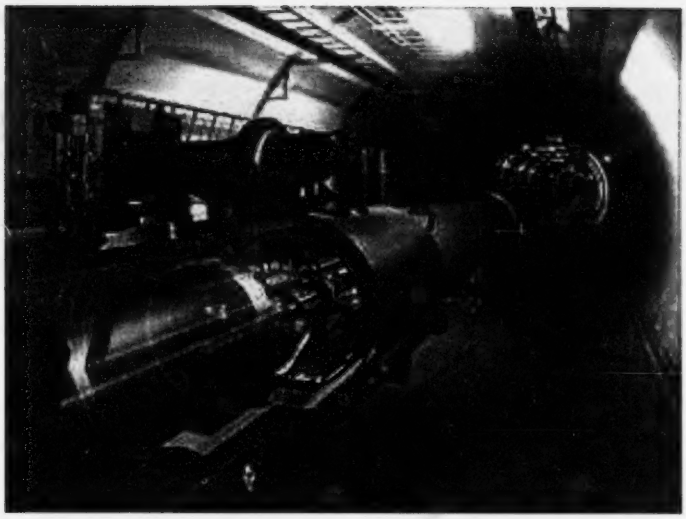
SNOLab, la deuxième infrastructure majeure en physique subatomique érigée au Canada, est actuellement en construction à la même profondeur que le SNO, le célèbre Observatoire de neutrinos de Sudbury. SNOLab sera l'installation expérimentale souterraine la plus profonde du monde et le plus exempt de rayonnements cosmiques parasites et, par conséquent, il offrira une sensibilité hors pair à des phénomènes rares. À titre d'exemple, SNOLab est l'emplacement idéal pour abriter les recherches sur la matière noire. Les expériences menées au SNOLab permettront de faire progresser notre compréhension de la physique des neutrinos, dans une proportion comparable, voire supérieure en importance, aux découvertes déjà faites par le SNO. SNOLab est doté d'un comité consultatif international sur les expériences qui a examiné une première série de lettres d'intention. Neuf projets possibles ont été recensés, avec une forte participation canadienne pour la plupart. Des travaux sont actuellement en cours pour mener à bien la R et D associée à ces projets en vue de déterminer s'ils permettront de tirer pleinement parti des caractéristiques particulières du laboratoire.

De nombreux laboratoires internationaux ont joué un rôle de premier ordre dans la physique subatomique et, dans les dix prochaines années, les activités canadiennes se concentreront dans quelques uns de ces laboratoires, que nous décrivons brièvement ci-après.

Le **Centre européen de recherches nucléaires ou CERN**, situé près de Genève, en Suisse, est actuellement le principal laboratoire international de physique des particules. Le CERN abrite le grand collisionneur de hadrons (LHC) qui repoussera de plus d'un ordre de grandeur la frontière de l'énergie, ce qui représente la percée la plus importante depuis des décennies. Les Canadiens ont fait d'importantes contributions à la fois au complexe d'accélérateur du LHC et au détecteur ATLAS. ATLAS sera l'un des pôles du programme de physique des particules canadien et mondial au cours des dix prochaines années.

Le **Thomas Jefferson National Accelerator Facility (JLab)** en Virginie fait partie d'un réseau de laboratoires financé par le Département de l'énergie des États-Unis. Ces installations ont été le site d'expériences capitales au cours des 50 dernières années, auxquelles les Canadiens ont souvent participé en grand nombre. Aujourd'hui, le JLab est le lieu où se concentre la plus grande partie des efforts du Canada en physique nucléaire menés à l'étranger et les physiciens nucléaires canadiens jouent un rôle de premier plan dans plusieurs des expériences clés qui s'y déroulent.

Le Japon abrite le laboratoire **J-PARC** et le détecteur souterrain de neutrinos **Super-Kamiokande** où l'on a réalisé des mesures déterminantes des oscillations de neutrinos produites par les collisions de rayonnements cosmiques avec l'atmosphère. L'expérience T2K utilisera le nouvel accélérateur à faisceaux de neutrinos de J-PARC : ces faisceaux seront dirigés vers le détecteur Super-Kamiokande pour explorer avec précision les propriétés des neutrinos. L'expérience fait directement suite aux oscillations de neutrinos observées par l'Observatoire de neutrinos de Sudbury et Super-Kamiokande.



Maquette du tunnel du LHC du CERN illustrant les deux canalisations contenant les faisceaux de protons de 7 TeV qui circuleront dans l'anneau de 27 km.

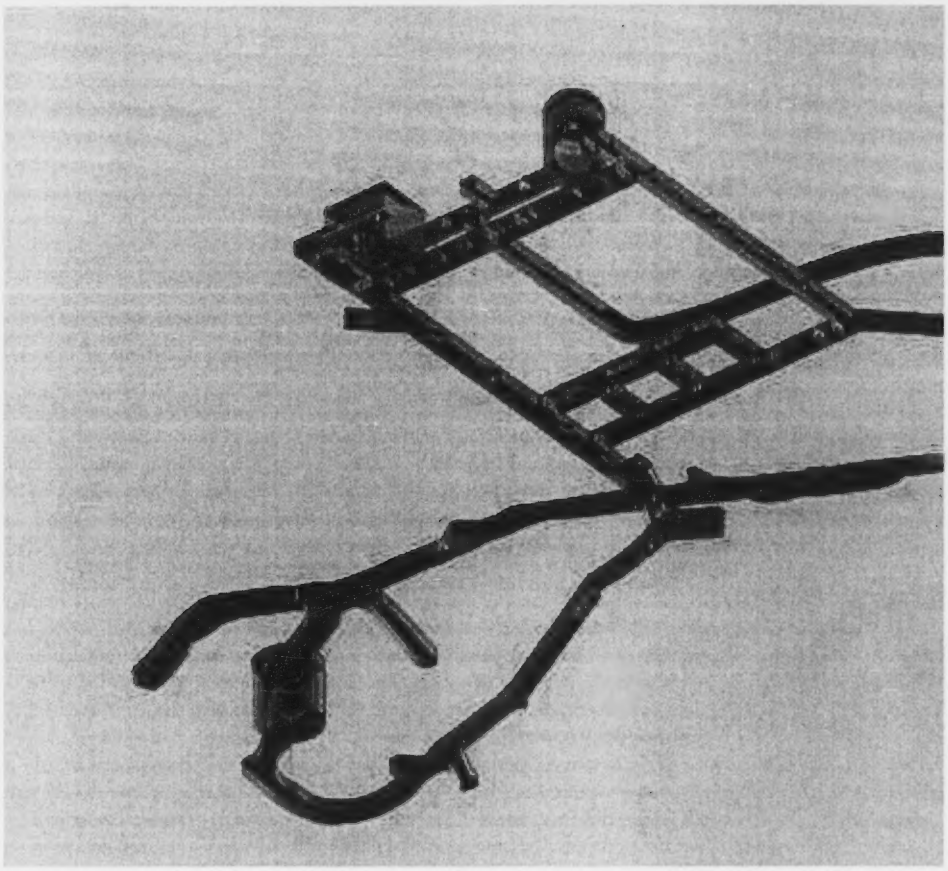
Les installations futures

Au cours de la période visée par le plan à long terme, de nouvelles installations majeures seront construites et des installations de premier plan seront modernisées. Elles modifieront le paysage de la physique subatomique à l'échelle mondiale. Les calendriers pour la mise en place de ces installations sont incertains, mais il convient d'en tenir compte comme toile de fond dans tout processus de planification à long terme. Dans certains cas, on parle d'agrandir ou d'accroître la capacité des installations actuelles comme l'installation ISAC ou le détecteur ATLAS au LHC.

À TRIUMF, les faisceaux d'ISAC seront fort sollicités, ce qui taxera les capacités du cyclotron en termes d'intensité totale et de durée utile de ses composantes radiosensibles. Le second faisceau de protons d'ISAC et les agrandissements du complexe d'accélérateurs d'ISAC afin d'offrir des faisceaux accélérés simultanés devraient être une priorité. TRIUMF devraient envisager les options qui lui permettraient de produire des faisceaux de protons à plus haute intensité pour ISAC à l'avenir, et il devrait être à la fine pointe des efforts internationaux visant à développer de nouvelles machines à haute intensité.

Au Jefferson Laboratory, on prévoit de porter l'énergie à la barre des « 12 GeV » dans les prochaines années, ce qui devrait permettre la réalisation de plusieurs expériences nouvelles où les Canadiens joueront un rôle de premier plan.

L'un des grands projets à venir, le collisionneur linéaire international (ILC), fait actuellement l'objet d'un vaste examen conceptuel après plusieurs années de R et D technique. La viabilité technique de la conception a été prouvée et l'objectif actuel est d'établir une estimation de coût fiable pour la machine d'ici la fin de 2008. Dans l'ILC, des électrons et des positrons se heurteront à une énergie de plusieurs centaines de GeV, qui permettra de mesurer avec finesse les nouveaux phénomènes découverts au LHC. Cette future installation en physique des particules arrive en tête des priorités établies par la communauté scientifique. Au cours de l'examen conceptuel du collisionneur linéaire international, on choisira le site d'implantation. Il est probable que l'ILC sera installé dans l'un des laboratoires

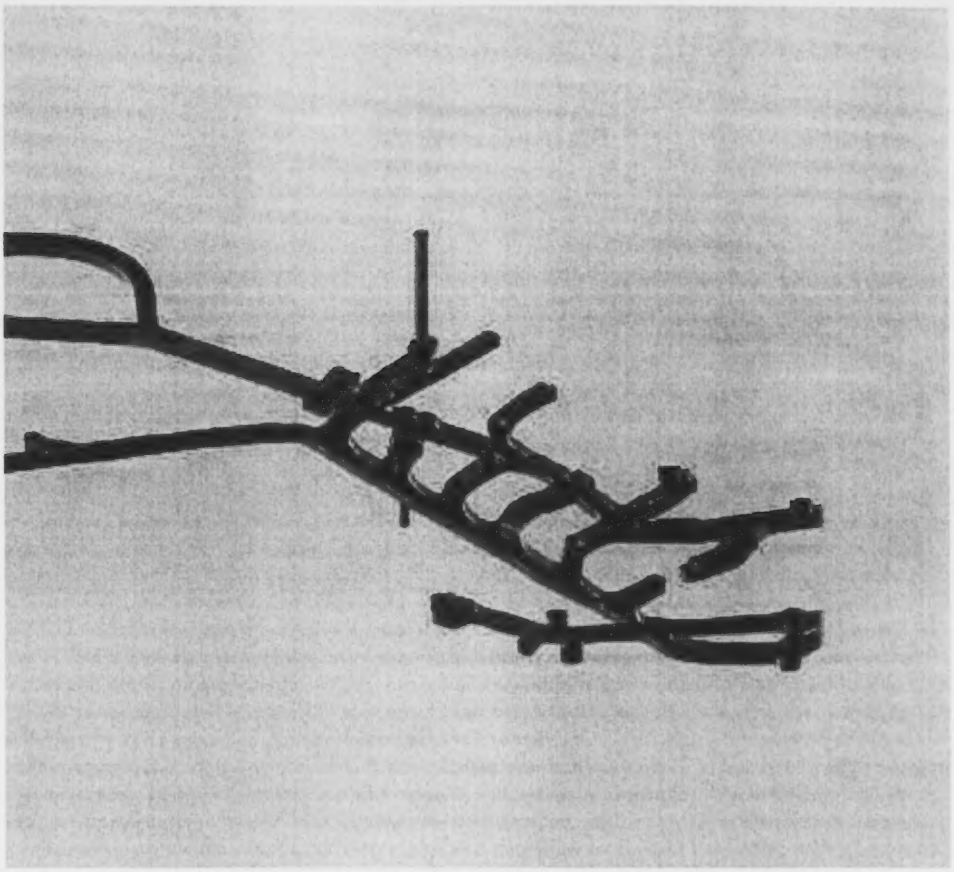


internationaux déjà aménagés, mais il nécessitera de nouveaux engagements de la communauté internationale à la fois pour la construction de l'accélérateur et des détecteurs et leur fonctionnement. La participation canadienne à une expérience à l'ILC dans les cinq dernières années du plan nécessitera des investissements majeurs en capital pour le détecteur et, très probablement, pour la construction de l'accélérateur lui même.

3.2 La communauté canadienne de physique subatomique

La communauté canadienne de physique subatomique comprend près de 250 chercheurs rattachés à des universités et à des laboratoires de différentes régions du pays. Leur nombre se répartit presque également entre les sous disciplines de la physique des particules, de la physique nucléaire et de la théorie. La physique subatomique du Canada a pris de l'ampleur depuis l'établissement du plan à long terme de 2001, et ce, grâce au recrutement régulier de nouveaux professeurs et de nouveaux titulaires de chaires de recherche du Canada. Environ un quart de ces chercheurs se sont joints à la communauté scientifique canadienne au cours de cette période, et là encore ils se répartissent de façon à peu près égale entre la physique des particules, la physique nucléaire et la théorie.

Ce renouvellement dynamique s'est accompagné d'une augmentation encourageante du nombre d'étudiants et de postdoctorants occupant des postes d'attachés de recherche. Le nombre d'étudiants des cycles supérieurs a progressé de 55 % au cours des cinq dernières années, ce qui témoigne de l'afflux de nouveaux chercheurs et de nouveaux débouchés.



Représentation schématique de la mine Creighton, située à une profondeur de 6 800 pieds, près de Sudbury. La caverne à l'extrême gauche a une hauteur d'environ 25 m et abrite l'expérience SNO; la nouvelle installation SNOLab est représentée par l'ensemble carré de tunnels, dans le coin gauche supérieur de la figure.

Deux événements majeurs ont ponctué le paysage de la physique subatomique canadienne au cours des cinq dernières années. La création de l'Institut Perimeter pour la physique théorique (à Waterloo, en Ontario) a eu une influence considérable sur la théorie subatomique au Canada. La plupart des scientifiques employés par l'Institut occupent des postes de professeurs auxiliaires dans des universités voisines et sont par conséquent admissibles au financement du CRSNG. En tant que chercheurs de pointe dans leurs domaines, les théoriciens de l'Institut jouent un rôle majeur dans le paysage de la recherche et son financement au Canada.

SNOLab, pour lequel la Fondation canadienne pour l'innovation a fourni le gros du financement, est également une percée majeure. Avec ce laboratoire, qui est une extension importante de l'infrastructure de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury, le Canada disposera d'installations expérimentales souterraines de grande profondeur pour les décennies à venir. Cette installation de premier ordre, qui est parmi les plus en pointe, peut accueillir des expériences nationales et internationales qui requièrent des environnements à faible rayonnement de fond. De nombreux chercheurs qui collaborent au SNO participent à des travaux de R et D afin d'explorer les techniques possibles pour les expériences qui se déroulent au SNOLab. Par ailleurs, l'installation a suscité l'intérêt des chercheurs œuvrant dans d'autres secteurs de la physique subatomique. L'exploitation de ce laboratoire sera au cœur du débat de fond sur le programme canadien de physique subatomique dont nous ferons état par la suite dans le présent document.

3.3 Réalisations au cours des cinq dernières années

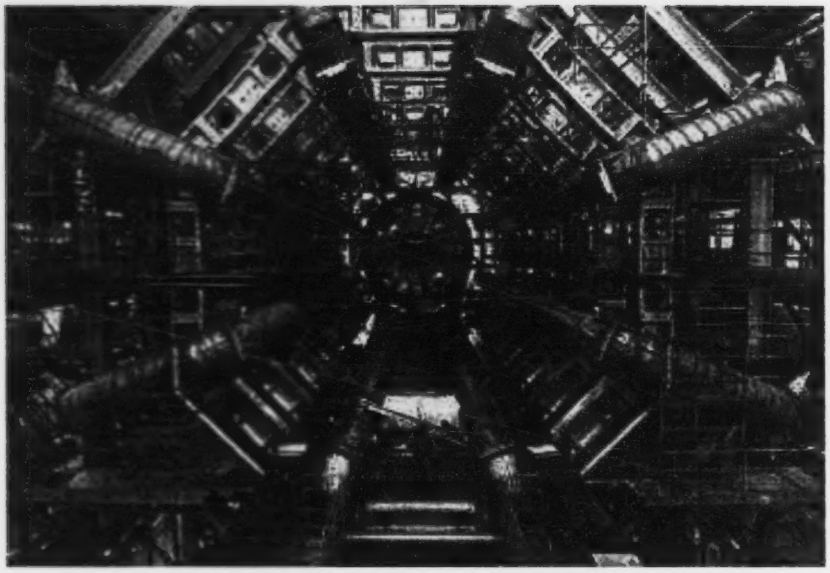
Au cours des cinq dernières années, la physique subatomique canadienne s'est concentrée sur trois projets de haute priorité : la construction du détecteur ATLAS pour étudier les collisions protons-protons au LHC du CERN, l'achèvement de l'accélérateur d'ISAC II et la préparation de l'appareillage pour étudier les isotopes radioactifs loin des zones de stabilité et l'achèvement de l'expérience du SNO sur les neutrinos solaires. Les impressionnantes réalisations dans chacun de ces domaines ont été complétées par un programme étendu d'initiatives expérimentales plus modestes et par les contributions d'une communauté de théoriciens canadiens dynamique et fort bien implantée.

L'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO) est l'un des emblèmes du succès de la physique subatomique canadienne. La résolution de l'énigme des neutrinos solaires au laboratoire lui a valu l'attention du monde entier. Les mesures du flux total de neutrinos du Soleil concordent de façon fort satisfaisante avec les prévisions du modèle solaire, et corroborent l'idée que le modèle solaire standard donne une description correcte de l'évolution des étoiles. Le SNO a résolu de façon concluante « l'énigme des neutrinos solaires » en démontrant qu'environ les deux tiers des neutrinos électroniques produits par le Soleil « oscillent » et se transforment en d'autres types de neutrinos avant d'atteindre la Terre. En outre, si l'on regroupe les résultats du SNO avec d'autres mesures des neutrinos d'origine solaire et terrestre, tout indique que ces oscillations sont induites par une masse. Ces différentes mesures permettent de mieux cerner la différence de masse et l'angle de mélange qui constituent des paramètres fondamentaux d'une extrême importance pour notre compréhension de la physique des neutrinos – et qui expliquent ces oscillations.

L'installation ISAC à TRIUMF est opérationnel depuis 2001 et ISAC-II est presque terminé. Ces deux installations forment à elles seules le principal complexe de faisceaux radioactifs du monde. Le champ de la physique nucléaire et de l'astrophysique nucléaire qui explore des noyaux exotiques de courte vie est considéré à l'échelle planétaire comme étant de la plus haute priorité. Plusieurs résultats importants ont déjà été produits par ISAC, dont la mesure de la production de magnésium de ^{21}Na [1], réaction qui est responsable de l'abondance dans la galaxie du ^{22}Na produit dans les environnements stellaires explosifs. Cette mesure résout le problème naguère tenace de la non-observation de ^{22}Na par les satellites d'astronomie des rayons gamma.

Les collisions protons-protons produites dans le LHC au CERN, aux plus hautes énergies accessibles sur Terre, permettront à l'expérience ATLAS de fournir une explication définitive de l'origine de la masse selon le modèle standard. Le groupe ATLAS Canada a maintenant terminé la construction et l'installation de composantes du détecteur dont il avait la charge et il joue un rôle très actif dans la mise en place de l'expérience ATLAS. Cette activité continue de prendre de l'expansion à mesure que les chercheurs canadiens se rendent en plus grand nombre sur place en préparation du premier faisceau en 2007. Les activités des physiciens d'ATLAS sont de plus en plus axées sur l'extraction des premières données et sur les calculs qui seront nécessaires pour traiter cet afflux de données.

[1] La réaction exacte est $^{21}\mathrm{Na} + p \rightarrow \gamma + {}^{22}\mathrm{Mg}$, qui s'écrit $^{21}\mathrm{Na}(p,\gamma)^{22}\mathrm{Mg}$.



Détecteur ATLAS partiellement assemblé, au LHC du CERN, à la fin de 2005. L'homme, près du centre au bas de la photographie, donne une idée de la grandeur du détecteur.

3.4 Notre vision de la recherche canadienne en physique subatomique

La physique subatomique canadienne occupe une position de force et fait montre de réalisations enviables. Le mandat pour les cinq prochaines années est clair : nous devons miser sur notre capital humain, nos installations de pointe à l'échelle planétaire et nos réalisations récentes pour demeurer des chefs de file mondiaux dans notre domaine scientifique. À court terme, nous devons exploiter les installations et les expériences auxquelles nous avons contribué, en mettant l'accent sur les plus hautes énergies disponibles (ATLAS), la physique nucléaire et l'astrophysique nucléaire (ISAC) ainsi que la physique des neutrinos (SNOLab et T2K). Notre exploitation de ces installations doit être proportionnelle à nos investissements passés – tant en capital humain que financier – et nous devons être au premier plan de l'avènement de la physique nouvelle et passionnante qui en émergera.

À plus long terme, il nous faudra prendre conscience du fait que les avancées dans notre science dépendent de la poursuite de la R et D en vue de projets futurs et que les projets les plus prometteurs nécessitent des investissements majeurs en capital. Les projets les plus importants se profilent déjà à l'horizon. Au cours de la seconde plage de cinq ans de notre plan, l'ILC sera une réalité, et la physique subatomique canadienne doit poursuivre un vigoureux programme de R et D pour avoir en main tous les atouts afin de jouer un rôle de premier plan sur ce front.

Compte tenu de la taille de notre communauté scientifique, nous ne pouvons participer à toutes les aventures de la physique subatomique. Toutefois, pour le dynamisme de notre discipline, il est nécessaire de maintenir la diversité. Cette diversité, qui prend la forme de plusieurs projets modestes, nous permet de conserver la souplesse nécessaire pour repérer et exploiter les nouveaux débouchés lorsqu'ils se présentent.

Par le passé, notre stratégie, qui consiste à investir le gros de nos ressources dans un petit nombre de projets hautement prioritaires tout en conservant une série diversifiée de projets plus modestes, s'est révélée fructueuse. Les Canadiens ont joué un rôle de premier plan en tant que porte-parole, porte parole adjoints, directeurs de la physique au sein des expériences, coordonnateurs d'expérience et chefs de groupes de physique dans pratiquement toutes les expériences auxquelles ils ont participé.

Notre vision accorde aux activités suivantes une haute priorité pour la physique subatomique canadienne au cours des dix prochaines années :

- exploitation intégrale du potentiel des nouvelles découvertes en physique, dans les collisions protons-protons aux plus hautes énergies possibles sur Terre au moyen du détecteur ATLAS;
- achèvement et exploitation intégrale de la principale installation mondiale de faisceaux radioactifs à ISAC (TRIUMF) pour la physique nucléaire et l'astrophysique nucléaire;
- achèvement et exploitation intégrale des installations du SNOLab, le laboratoire souterrain de grande profondeur ayant le plus faible rayonnement parasite au monde, y compris le financement d'immobilisations en vue d'une participation majeure à une série d'expériences pour tirer parti de cet environnement exceptionnel;
- participation au programme d'étude des oscillations de neutrinos sur longue distance;
- R et D en vue d'une participation majeure à l'ILC, y compris aux délibérations internationales concernant son calendrier et son site d'implantation.

Nous nous attendons à ce qu'environ 75 % de la communauté de physique subatomique du Canada participe aux programmes susmentionnés. La participation à un programme diversifié est un gage de santé à long terme pour notre discipline et nous recommandons par conséquent que l'on considère comme hautement prioritaire :

- le maintien de la diversité des efforts de recherche, permettant à la communauté d'exploiter les idées nouvelles et les débouchés à mesure qu'ils se présentent.

Ce programme étendu continuera d'attirer au Canada les chercheurs les plus brillants du domaine et pourrait bien donner naissance à des initiatives nouvelles qui deviendront des éléments majeurs du programme de physique subatomique de demain.

Nous pensons que cette vision nous placera à la fine pointe de notre science, qu'elle permettra de participer à l'enthousiasme que susciteront les projets actuellement en cours, et qu'elle conduira à de nouveaux projets qui exploiteront les découvertes qu'ils auront livrés.

4
Les questions fondamentales : Le programme canadien

La physique subatomique se démarque par deux caractéristiques notables : sa nature fondamentale et le modèle standard prédominant qui la décrit. Les questions clés sont explorées par diverses démarches complémentaires, allant de la physique nucléaire aux basses énergies jusqu'à la physique des particules aux hautes énergies. Un lien étroit entre théorie et expérience est également essentiel, et le programme canadien est un mélange bien équilibré de théorie et de projets expérimentaux.

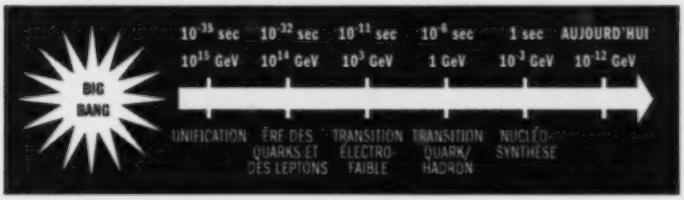
Les physiciens subatomiques canadiens effectuent leurs travaux dans des laboratoires au Canada et partout dans le monde. S'appuyant sur des technologies et des concepts novateurs, leur ascendant scientifique les a conduits à des découvertes majeures, à des avancées théoriques et à des mesures précises de processus d'intérêt crucial. Dans la présente section, nous mettons en lumière les réalisations récentes et définissons un programme équilibré pour les dix prochaines années qui fera fond sur nos atouts et aura des retombées importantes sur les avancées de la physique subatomique.

4.1 Situation actuelle de la physique subatomique

L'objectif de la recherche en physique subatomique est de comprendre l'évolution de l'Univers et de la matière qu'il renferme. Selon la théorie du Big Bang, l'Univers est né d'une explosion cosmique. Cet univers primordial extrêmement chaud et dense a donné naissance à une mer de particules en constantes interactions entre elles. Depuis lors, l'Univers a refroidi et ses particules se sont depuis longtemps désintégrées, annihilées sous forme de photons ou condensées en formant de la matière nucléaire. Le monde de l'infiniment grand (domaine de la cosmologie) et

celui de l'infiniment petit (domaine de la physique des particules et physique nucléaire) sont étroitement reliés du fait que les propriétés des particules et de la matière nucléaire ont défini les conditions de l'Univers primordial à partir desquelles les structures cosmologiques se sont formées.

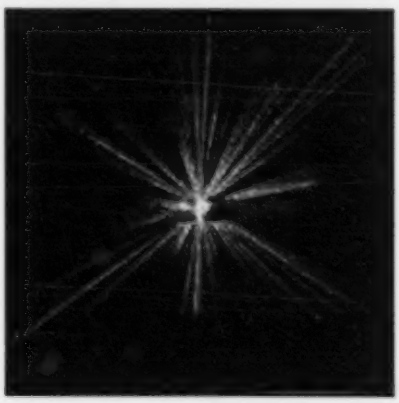
La chronologie des événements qui ont suivi le Big Bang



Du point de vue de la physique subatomique, la plupart des événements qui nous intéressent se sont produits dans les premières secondes qui ont suivi le Big Bang. On pense qu'au tout début, toutes les interactions de l'Univers se fondaient en une seule et même force. À mesure que l'Univers s'est refroidi et a pris de l'expansion, il est passé par de nombreuses phases. Après une expansion rapide, l'Univers est devenu un véritable « magma » brûlant de particules élémentaires : les quarks et les leptons. Puis, les quarks se sont condensés et regroupés en hadrons. Ensuite, après environ une seconde, on assiste à la nucléosynthèse, c. à d. la formation de matière nucléaire.

Pour étudier les particules et la matière qui ont existé à ces divers moments, nous les recréons en laboratoire à l'aide d'accélérateurs. Les physiciens du Canada qui travaillent dans les sous disciplines de la physique nucléaire, de la physique des particules et de l'astrophysique des particules explorent l'ensemble des phénomènes physiques décrits par cette chronologie, et dont la compréhension nous permet de répondre aux questions fondamentales posées à la section 2. Dans les pages qui suivent, nous présentons une brève introduction à la physique subatomique, pour ensuite montrer comment le programme canadien permet de répondre aux questions fondamentales grâce à des démarches complémentaires.

Selon le modèle standard, il y a trois familles de quarks (u,d), (c,s), (t,b)[2], les leptons chargés (e,μ,τ) et les leptons neutres (les neutrinos : ν_e,ν_μ,ν_τ) (voir la figure 1). Il y a également les médiateurs des interactions électromagnétique, faible et forte, c. à d. les photons (γ), les bosons $W^{\pm}$ et Z^0 et les gluons. L'interaction électromagnétique fait partie de la vie de tous les jours. L'interaction faible se manifeste par la désintégration radioactive, et l'interaction forte maintient les quarks ensemble à l'intérieur des protons, des neutrons et des autres hadrons.



Représentation artistique d'une collision à haute énergie entre électrons et positrons, qui produit de nombreuses particules secondaires.

[2] Le type de quark est appelé « saveur ».

Aux hautes énergies, les interactions électromagnétique et faible s'unissent pour former l'interaction électrofaible. Plusieurs prix Nobel ont été attribués pour les progrès théoriques et les expériences élégantes qui les ont confirmés. La théorie des interactions fortes porte le nom de chromodynamique quantique (CDQ). Les interactions électrofaibles et la CDQ décrivent toutes les interactions prévues par le modèle standard, que l'on peut tester en mesurant les propriétés et les interactions détaillées des quarks, des leptons et des bosons médiateurs. Les tests précis réalisés jusqu'à présent ne sont pas parvenus à découvrir de lacunes majeures dans le modèle standard.

Particules élémentaires

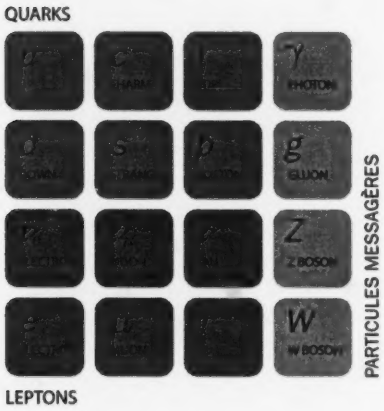


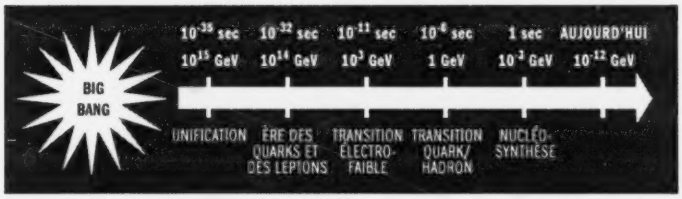
Figure 1 : Les trois familles de quarks et de leptons dans le modèle standard

Les physiciens ont établi que le modèle standard décrit extrêmement bien la plus grande partie de la matière et ses interactions. Le défi permanent est de toujours pousser plus loin l'applicabilité du modèle standard à une gamme plus étendue de phénomènes. Certaines questions demeurent en suspens. Par exemple, on ignore pour l'instant comment les particules ont été dotées d'une masse. Selon le modèle standard, le mécanisme de Higgs donne naissance aux masses des particules élémentaires. Le boson de Higgs est la seule particule du modèle standard qui n'a pas été observée directement. Aucun signal clair correspondant à ce boson n'a été détecté dans les expériences au grand collisionneur électrons positrons (LEP) du CERN. Si on ajoute à ce constat les mesures précises de la masse du quark top, cela limite fortement la masse que pourrait avoir le boson de Higgs. Le collisionneur Tevatron à Fermilab pourrait être assez sensible pour détecter ce boson, car le régime d'énergie du Tevatron est plus élevé que ce qui était possible au LEP, mais le test définitif proviendra des expériences qui seront menées au LHC, où l'on devrait découvrir le boson de Higgs, s'il existe, sous la forme prédite. La découverte du boson de Higgs et l'étude de ses propriétés sont les principaux objectifs de l'expérience ATLAS.

Les symétries de la nature sont particulièrement importantes en physique subatomique. Les symétries aboutissent aux lois de conservation comme la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Si l'on comprend la nature et l'origine de ces lois de conservation, on peut comprendre beaucoup mieux les processus d'interaction. Dans certains systèmes, les symétries sont brisées et dès lors les lois de conservation cessent d'être valides. Si l'on comprend pourquoi et comment ces symétries sont brisées, on peut de nouveau approfondir notre connaissance des processus physiques. Les trois symétries particulièrement pertinentes sont l'invariance sous parité (dénotée *P*), qui signifie que les lois de la physique sont invariantes si toutes les coordonnées spatiales sont inversées; l'invariance sous conjugaison de charge (dénotée *C*) qui exige que la physique soit

celui de l'infiniment petit (domaine de la physique des particules et physique nucléaire) sont étroitement reliés du fait que les propriétés des particules et de la matière nucléaire ont défini les conditions de l'Univers primordial à partir desquelles les structures cosmologiques se sont formées.

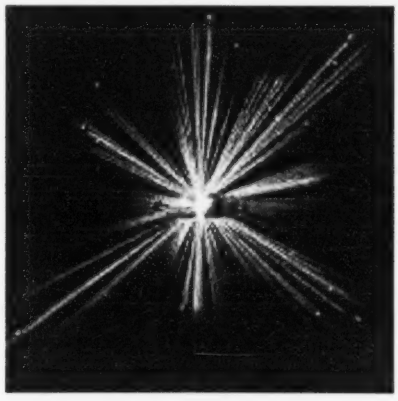
La chronologie des événements qui ont suivi le Big Bang



Du point de vue de la physique subatomique, la plupart des événements qui nous intéressent se sont produits dans les premières secondes qui ont suivi le Big Bang. On pense qu'au tout début, toutes les interactions de l'Univers se fondaient en une seule et même force. À mesure que l'Univers s'est refroidi et a pris de l'expansion, il est passé par de nombreuses phases. Après une expansion rapide, l'Univers est devenu un véritable « magma » brûlant de particules élémentaires : les quarks et les leptons. Puis, les quarks se sont condensés et regroupés en hadrons. Ensuite, après environ une seconde, on assiste à la nucléosynthèse, c. à d. la formation de matière nucléaire.

Pour étudier les particules et la matière qui ont existé à ces divers moments, nous les recréons en laboratoire à l'aide d'accélérateurs. Les physiciens du Canada qui travaillent dans les sous disciplines de la physique nucléaire, de la physique des particules et de l'astrophysique des particules explorent l'ensemble des phénomènes physiques décrits par cette chronologie, et dont la compréhension nous permet de répondre aux questions fondamentales posées à la section 2. Dans les pages qui suivent, nous présentons une brève introduction à la physique subatomique, pour ensuite montrer comment le programme canadien permet de répondre aux questions fondamentales grâce à des démarches complémentaires.

Selon le modèle standard, il y a trois familles de quarks (u,d), (c,s), (t,b)[2], les leptons chargés (e,μ,τ) et les leptons neutres (les neutrinos : ν_e,ν_μ,ν_τ) (voir la figure 1). Il y a également les médiateurs des interactions électromagnétique, faible et forte, c. à d. les photons (γ), les bosons $W^{\pm}$ et Z^0 et les gluons. L'interaction électromagnétique fait partie de la vie de tous les jours. L'interaction faible se manifeste par la désintégration radioactive, et l'interaction forte maintient les quarks ensemble à l'intérieur des protons, des neutrons et des autres hadrons.



Représentation artistique d'une collision à haute énergie entre électrons et positrons, qui produit de nombreuses particules secondaires.

[2] Le type de quark est appelé « saveur ».

Aux hautes énergies, les interactions électromagnétique et faible s'unissent pour former l'interaction électrofaible. Plusieurs prix Nobel ont été attribués pour les progrès théoriques et les expériences élégantes qui les ont confirmés. La théorie des interactions fortes porte le nom de chromodynamique quantique (CDQ). Les interactions électrofaibles et la CDQ décrivent toutes les interactions prévues par le modèle standard, que l'on peut tester en mesurant les propriétés et les interactions détaillées des quarks, des leptons et des bosons médiateurs. Les tests précis réalisés jusqu'à présent ne sont pas parvenus à découvrir de lacunes majeures dans le modèle standard.

Particules élémentaires

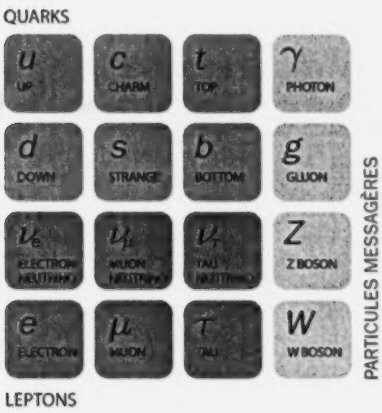


Figure 1 : Les trois familles de quarks et de leptons dans le modèle standard

Les physiciens ont établi que le modèle standard décrit extrêmement bien la plus grande partie de la matière et ses interactions. Le défi permanent est de toujours pousser plus loin l'applicabilité du modèle standard à une gamme plus étendue de phénomènes. Certaines questions demeurent en suspens. Par exemple, on ignore pour l'instant comment les particules ont été dotées d'une masse. Selon le modèle standard, le mécanisme de Higgs donne naissance aux masses des particules élémentaires. Le boson de Higgs est la seule particule du modèle standard qui n'a pas été observée directement. Aucun signal clair correspondant à ce boson n'a été détecté dans les expériences au grand collisionneur électrons positrons (LEP) du CERN. Si on ajoute à ce constat les mesures précises de la masse du quark top, cela limite fortement la masse que pourrait avoir le boson de Higgs. Le collisionneur Tevatron à Fermilab pourrait être assez sensible pour détecter ce boson, car le régime d'énergie du Tevatron est plus élevé que ce qui était possible au LEP, mais le test définitif proviendra des expériences qui seront menées au LHC, où l'on devrait découvrir le boson de Higgs, s'il existe, sous la forme prédite. La découverte du boson de Higgs et l'étude de ses propriétés sont les principaux objectifs de l'expérience ATLAS.

Les symétries de la nature sont particulièrement importantes en physique subatomique. Les symétries aboutissent aux lois de conservation comme la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Si l'on comprend la nature et l'origine de ces lois de conservation, on peut comprendre beaucoup mieux les processus d'interaction. Dans certains systèmes, les symétries sont brisées et dès lors les lois de conservation cessent d'être valides. Si l'on comprend pourquoi et comment ces symétries sont brisées, on peut de nouveau approfondir notre connaissance des processus physiques. Les trois symétries particulièrement pertinentes sont l'invariance sous parité (dénotée *P*), qui signifie que les lois de la physique sont invariantes si toutes les coordonnées spatiales sont inversées; l'invariance sous conjugaison de charge (dénotée *C*) qui exige que la physique soit

identique pour les particules et les antiparticules; et l'invariance sous inversion de temps (dénotée *T*) en vertu de laquelle les lois de la physique sont réversibles dans le temps. À partir de ces principes fondamentaux, la combinaison de ces trois symétries, *CPT*, est considérée comme invariante dans tous les types d'interactions.

Les interactions forte et électromagnétique sont invariantes sous *P* et *C* et par l'opération combinée *CP*. Toutefois, les désintégrations faibles violent *P* et *C*, mais ce n'est que dans de rares cas que la combinaison *CP* est violée, avec des conséquences intéressantes. L'observation de la violation de symétrie *CP* dans le système de kaons neutres a valu à son auteur le Prix Nobel de 1980, et l'étude de processus similaires dans d'autres particules (mésons *B* et neutrinos) est l'une des quêtes fondamentales de la physique subatomique d'aujourd'hui.

La compréhension des propriétés de base de la matière et de l'antimatière est un préalable pour comprendre la façon dont l'Univers a évolué depuis le Big Bang. En particulier l'observation que nous vivons dans un Univers dominé par la matière implique qu'à un certain moment après le Big Bang il y a eu des phénomènes physiques qui ont fait que la quantité de matière a dépassé celle de l'antimatière, qui n'a pu être complètement annihilée. Même si cette quantité est minuscule, elle n'est pas nulle. L'asymétrie baryons-antibaryons qui en a résulté est appelée baryogénèse. La violation de *CP* autorise différents comportements de la matière et de l'antimatière, et le modèle standard peut intégrer la violation de *CP* dans le secteur des quarks. Toutefois, elle semble insuffisante pour rendre compte de l'asymétrie baryons antibaryons observée dans l'Univers. Un autre mécanisme doit entrer en ligne de compte. Si l'on postule l'invariance *CPT*, la violation de *CP* implique alors que la symétrie T doit être violée. On assiste à un effort scientifique planétaire pour comprendre les conséquences et les origines de la violation de *CP* (ou de *T*) à la fois dans les systèmes de quarks et de leptons.

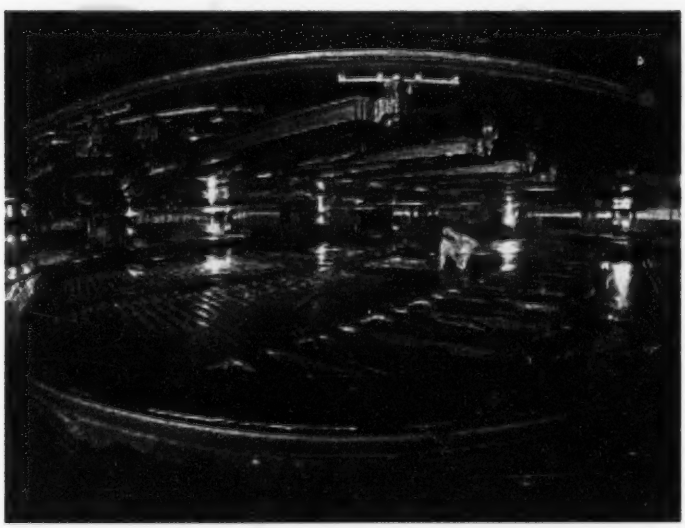
Une propriété intéressante des interactions faibles est que les quarks se « mélangent », ou passent d'une saveur à l'autre. Dans les interactions faibles, les quarks sont des mélanges d'états quantiques correspondant à diverses saveurs. Le degré de mélange est représenté mathématiquement par la matrice de Cabibbo Kobayashi Maskawa (CKM), dont les éléments décrivent la fraction de chaque composite. La mesure de ces éléments de matrice a constitué un volet important de l'effort de recherche mondial à l'aide des accélérateurs. En outre, la mesure précise de nombreux éléments de la matrice CKM s'appuie sur des expériences de physique nucléaire et constitue une partie importante des programmes de recherche dans les installations de faisceaux radioactifs comme ISAC.

Le Prix Nobel de 2002 a été attribué pour l'étude des neutrinos d'origine extraterrestre. Les neutrinos sont abondants et sont produits au cœur du Soleil, dans le noyau radioactif de la Terre, dans les réacteurs nucléaires, par l'interaction des rayons cosmiques dans l'atmosphère, et par divers phénomènes astrophysiques. Les découvertes récentes à l'aide de détecteurs souterrains comme celui du SNO ont démontré avec éclat que les neutrinos ont une masse et peuvent se mélanger. Cette découverte a créé de nouveaux défis et ouvert des débouchés dans un champ d'étude riche en possibilités. Nous commençons à peine à comprendre les propriétés des neutrinos. Des efforts considérables sont déployés de par le monde pour mesurer les paramètres de la matrice de mélange des neutrinos. À la différence des quarks, les neutrinos semblent se mélanger assez fortement. Si le neutrino est sa propre antiparticule, cela conduit à l'hypothèse passionnante d'une importante violation de *CP* dans le secteur des neutrinos qui, associée aux couplages quarks leptons aux très hautes énergies, pourrait en fin de compte expliquer l'asymétrie matière antimatière observée dans l'Univers.

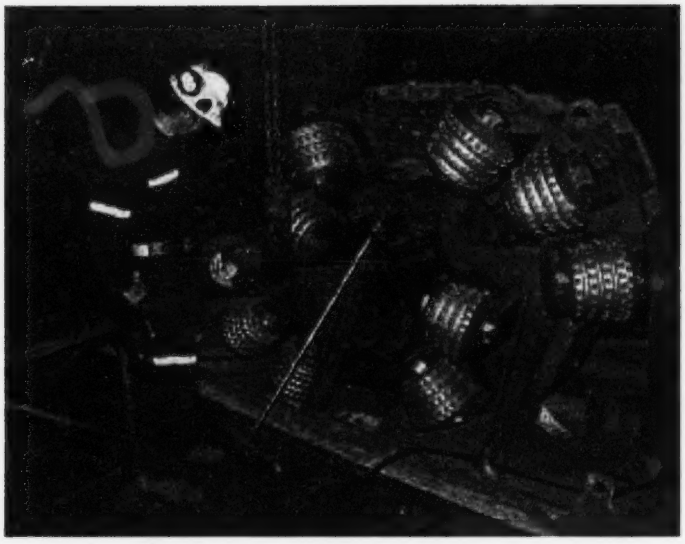
Bien que le modèle standard ait été extrêmement satisfaisant pour décrire le monde où nous vivons, il n'explique pas à partir des principes fondamentaux les nombreux paramètres nécessaires dans le modèle. Il ne peut rendre compte de la matière noire, et l'origine de la masse légère des neutrinos pose problème dans de nombreuses théories. Ces indices expérimentaux, outre le développement de théories de grande unification où les interactions électromagnétique, faible et forte s'unissent aux très hautes énergies, portent à croire que le modèle standard est une approximation à faible énergie d'une théorie plus générale. La théorie de la supersymétrie, selon laquelle des particules nombreuses et nouvelles seront observables aux énergies du LHC, est bien étayée. Ces particules non observées pourraient avoir existé aux très hautes énergies qui caractérisent l'Univers primordial et il est possible qu'elles aient obéi aux lois d'une physique différente de celle qui prévaut dans l'Univers froid d'aujourd'hui. Les signatures indirectes de la nouvelle physique à plusieurs TeV d'énergie peuvent également être fournies par la physique nucléaire, grâce à la mesure précise des observables du modèle standard ou par l'observation de phénomènes interdits ou supprimés dans le modèle standard.

Les mesures astronomiques ont récemment révélé qu'une petite fraction seulement de la masse totale de l'Univers est formée de matière lumineuse (comme les étoiles). La vitesse de rotation des galaxies ne peut être expliquée par la gravité einsteinienne ou newtonienne que si 80 % de leur masse est constituée de matière noire qui n'émet aucun rayonnement et par conséquent n'est pas visible. Cette conclusion est étayée par la plupart des récentes études de haute précision du fond de rayonnement cosmique. Il est crucial de comprendre la matière noire, et les recherches en ce sens s'appuient simultanément sur plusieurs disciplines – la cosmologie, la physique subatomique et l'astrophysique.

Si la supersymétrie est une théorie valide, une possibilité très attrayante est que la plus légère des particules supersymétriques qui ne se désintègre pas pourrait constituer la matière noire. Les recherches sur la matière noire seront au cœur de plusieurs expériences au SNOLab.



À l'intérieur du cyclotron H^- de 500 MeV de TRIUMF, le plus grand cyclotron au monde.



Un tunnelier utilisé pour excaver le nouveau laboratoire SNOLab dans la mine Creighton.

Les quarks et les gluons se sont combinés pour former des hadrons à $t \sim 10^{-6}$s après le Big Bang. La chromodynamique quantique est le cadre théorique qui décrit les interactions des quarks et des gluons. Sur de courtes distances ou à de hautes énergies, l'interaction quark-quark est très faible. Le Prix Nobel de 2004 a été attribué pour l'élucidation de cette liberté dite « asymptotique ». Les calculs des processus dans ce régime sont fiables et ont établi que la CDQ est une théorie robuste. Sur de longues distances (comme dans les expériences de diffusion), la force de l'interaction quark-quark devient très importante. On n'a jamais observé de quark libre, et le mécanisme du confinement est un domaine d'étude très dynamique dans les interactions fortes, à la fois sur le plan expérimental et théorique. Les avancées dans les techniques de calcul en CDQ, de même que les nouvelles données expérimentales précises, pourraient révolutionner notre compréhension de la structure des hadrons.

À mesure que l'Univers s'est refroidi, il est entré dans la phase de la nucléosynthèse primordiale – la formation de noyaux comme H, He et Li à partir des protons et de neutrons. Tous les autres éléments de l'Univers ont été créés par suite de réactions nucléaires survenues dans les étoiles, les explosions de supernovæ, les novæ et par la fusion des étoiles à neutrons. De nombreuses questions restent sans réponse en ce qui a trait à l'origine de la matière dans l'Univers. Il s'agit notamment de comprendre en détail l'origine des éléments; le mécanisme d'effondrement du cœur des supernovæ, la structure et le refroidissement des étoiles à neutrons; l'origine, la propagation et l'interaction des rayons cosmiques aux très hautes énergies, ainsi que la nature des sources de rayons gamma galactiques et extragalactiques. On espère obtenir réponse à ces questions importantes grâce à des modèles perfectionnés en astrophysique, à des simulations raffinées sur ordinateur, à des percées dans l'observation et à une meilleure compréhension de la physique nucléaire de base.

Plusieurs questions fondamentales sont intimement liées aux propriétés de la matière dans des conditions extrêmes, comme les densités et les températures très élevées, ainsi que les rapports extrêmes protons/neutrons dans des environnements astrophysiques explosifs. Dans de telles conditions, on observe la

production de noyaux exotiques à courte vie qui jouent un rôle décisif dans des processus astrophysiques clés. D'énormes progrès ont été réalisés dans les installations de faisceaux radioactifs vouées à la mesure de la structure et des réactions des noyaux présentant un intérêt pour l'astrophysique. Il s'agit notamment de mesurer divers processus de capture nucléaire et de déterminer les masses, les demi-vies et les structures de noyaux rares observés dans des événements cataclysmiques stellaires, comme les explosions de novæ ou de supernovæ. L'objectif est de reconstruire les scénarios de manière détaillée et d'étudier les interactions en laboratoire. Les scientifiques canadiens sont fort bien placés pour faire de nouvelles découvertes et exploiter cette physique grâce au laboratoire ISAC à TRIUMF, le centre de faisceaux radioactifs le plus perfectionné au monde.

4.2 Physique des neutrinos

Neutrinos solaires

Une des découvertes récentes les plus extraordinaires dans le secteur électrofaible a été que les neutrinos ont une masse, ce qui a été démontré de façon concluante par le SNO, l'Observatoire de neutrinos de Sudbury. Pendant plus de 30 ans, en réalisant diverses expériences sensibles à différents segments du spectre d'énergie des neutrinos, les scientifiques ont constaté que le Soleil ne produisait pas autant de neutrinos que ne prédisait le modèle solaire standard. Le taux observé de neutrinos électroniques (c. à d. le type de neutrinos produits par le Soleil) arrivant sur la Terre représentait environ un tiers du nombre total prévu par le modèle solaire standard. Ce problème tenace, appelé « problème de neutrinos solaires », a catalysé des progrès énormes dans le raffinement des modèles des processus stellaires, mais l'énigme persistait.

À la différence des expériences précédentes, le SNO avait un atout de taille : il était simultanément sensible d'une part aux neutrinos électroniques grâce à une réaction particulière, et d'autre part à toutes les saveurs de neutrinos grâce à une autre réaction. En comparant les taux des deux réactions, le SNO a démontré que les neutrinos, créés à l'origine sous forme de neutrinos électroniques, se transforment en un autre type de neutrinos pendant leur trajet vers la Terre. Or, ce comportement, appelé « oscillations », n'est possible que si les neutrinos ont une masse. Le SNO a également permis de constater que le nombre total de neutrinos produits par le Soleil correspond très bien aux prévisions détaillées du modèle solaire, ce qui signifie que nous comprenons bien les réactions de fusion qui se produisent au cœur du Soleil. Les résultats du SNO ont eu des retombées majeures, et les trois premiers articles qui les présentaient ont été cités plus de 3 000 fois !

On peut décrire les données sur l'oscillation des neutrinos par un mécanisme de mélange à trois neutrinos, dans lequel les états de saveur $\nu_\alpha(\alpha = e, \mu, \tau)$ sont associés aux états de masse ν_i (où i=1,2,3) par l'intermédiaire d'une matrice de mélange leptonique unitaire, la matrice de Pontecorvo Maki Nakagawa Sakata (PMNS), illustrée à la figure 2. Les résultats du SNO, combinés aux résultats obtenus par l'expérience de Super Kamiokande et des expériences sur accélérateur, imposent des contraintes majeures aux angles de mélange de neutrinos permis θ_{ij}, et aux différences de masse Δm^2_{ij}. On constate que les angles θ_{12} et θ_{23} sont de grande amplitude par rapport aux angles de faible amplitude des mélanges mesurés dans le secteur des quarks. Les masses de neutrinos semblent être très faibles, et ne peuvent donc pas représenter une part importante de la matière noire manquante dans l'Univers. Cette conclusion laisse également entendre que l'Univers poursuivra probablement son expansion à jamais, plutôt que de connaître un effondrement gravitationnel jusqu'à un éventuel « Big Crunch ».

L'expérience SNO prendra fin en décembre 2006. Une nouvelle expérience a été proposée, SNO+, dans laquelle on remplacera l'eau lourde dans la cuve du SNO par un scintillateur liquide afin d'étudier les neutrinos solaires à faible énergie (selon la réaction « *pep* »). Le flux pep est calculé à ±1,5 % dans le modèle solaire standard, et il serait alors possible d'améliorer grandement la précision de l'angle de mélange θ_{12}. Aux hautes énergies, comme celle des neutrinos produits par le ^8B et observés par le SNO, on prévoit que la propagation des neutrinos dans le Soleil est dominée par des interactions résonantes avec la matière (l'effet MSW). Toutefois, divers autres mécanismes ont été proposés, comme des interactions de neutrinos non standard, des neutrinos de masse variable, des mélanges de neutrinos stériles, la violation de symétrie *CPT*. Aux énergies types de la réaction *pep*, les neutrinos sont très sensibles au mécanisme spécifique en cause, et l'étude de cette région est essentielle pour comprendre la physique sous jacente aux oscillations des neutrinos. L'expérience SNO+ pourrait également mesurer les géoneutrinos produits par la radioactivité naturelle au sein de la Terre, permettant ainsi aux géologues de mesurer la distribution de la radioactivité dans la Terre. L'expérience SNO+ utiliserait le détecteur SNO actuel et son infrastructure existante, s'appuierait sur l'expertise acquise par la collaboration SNO, et aurait un impact majeur sur notre connaissance des propriétés des neutrinos.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta CP} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta CP} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta CP} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{13}c_{23}e^{i\delta CP} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta CP} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

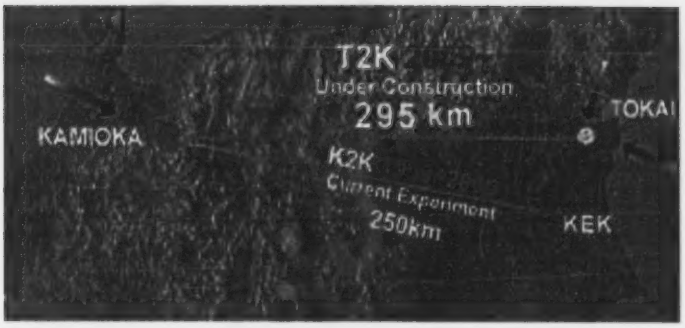
Figure 2 : La matrice de Pontecorvo Maki Nakagawa Sakata (PMNS) décrit les oscillations de neutrinos. Dans la matrice, $s(c)_{ij}$ représente sin(cos)θ_{ij} etc.

Expériences sur les neutrinos avec accélérateurs

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les angles θ_{12} et θ_{23} sont maintenant raisonnablement bien déterminés grâce à l'étude des neutrinos solaires et des neutrinos produits par réacteurs et accélérateurs. La prochaine étape consiste donc à déterminer la valeur de l'angle θ_{13}, que l'on croit très faible. L'expérience SNO permettra de contraindre cette quantité, grâce à des mesures plus fines au cours de la prochaine année, mais, en définitive, il faudra recourir à une expérience portant expressément sur les oscillations des neutrinos sur longue distance.

Les physiciens canadiens participent à l'expérience T2K (Tokai to Kamioka), qui utilisera l'accélérateur J-PARC au Japon. Celui ci produira un faisceau intense de neutrinos muoniques hors axe à faible énergie, avec une gamme d'énergie étroite et ne comportant qu'une courte queue à haute énergie. En ayant une certaine connaissance des éléments de mélange PMNS, il sera possible d'exploiter pleinement le potentiel de découverte en sélectionnant pour le faisceau un régime d'énergie correspondant à la distance. Le but de l'expérience T2K, au cours des cinq premières années, sera d'observer la transition de ν_μ à ν_e, afin de démontrer que $\theta_{13} \neq 0$. Si le neutrino est sa propre antiparticule, il sera alors possible de constater d'importantes phases de violation de *CP*, ce qui permettrait d'expliquer l'asymétrie des baryons dans l'Univers.

Si on constate que θ_{13} a une amplitude relativement importante, une étape ultérieure de l'expérience T2K consistera à accroître la puissance du faisceau de l'accélérateur et à construire un détecteur de Tcherenkov contenant 1 mégatonne d'eau (Hyper Kamiokande) au laboratoire Kamioka. On accroîtrait ainsi d'un ordre de grandeur la sensibilité de détection des oscillations ν_μ à ν_e, et probablement d'éventuelles violations de *CP* dans le secteur des neutrinos. À plus long terme, on envisage de construire dans différents laboratoires des sources de neutrinos à haute intensité, utilisant des faisceaux de muons stockés. C'est un



Carte de la partie centrale de l'île de Honshu, au Japon, indiquant les trajectoires suivies par les faisceaux de neutrinos pour les expériences K2K et T2K.

domaine nouveau et en croissance, stimulé par la confirmation par le SNO que les neutrinos ont une masse. Il est donc fort probable que de nouvelles découvertes passionnantes en physique seront faites au cours de la prochaine décennie.

Double désintégration β sans émission de neutrinos

Si les expériences sur les oscillations des neutrinos, comme celles qui ont été réalisées au SNO, ont démontré que les neutrinos possèdent une masse, elles ne permettent pas de mesurer directement cette masse. Selon les limites supérieures provenant de mesures directes de la désintégration β du tritium, nous savons que $m_{\nu_e} < 2.2$eV. Cette valeur est encore beaucoup plus élevée que les masses prévues de neutrinos, et l'on a besoin de nouvelles techniques de mesure. Certains noyaux peuvent se désintégrer par double désintégration β sans émission de neutrinos, une réaction très rare. Le taux de réaction dépend de la masse du neutrino, et de nombreuses expériences sont réalisées partout dans le monde pour traquer cette réaction. Seuls quelques noyaux permettent les transitions énergétiques autorisées, et tout porte à croire que le taux de réaction est inférieur à une désintégration par kilogramme année, et qu'il est probablement de l'ordre d'une désintégration par tonne année. Ces études requièrent une compréhension fine des éléments de la matrice nucléaire, et à cette fin il faudra disposer des données fournies par les expériences au laboratoire ISAC et réaliser des progrès en théorie nucléaire.

La réaction n'est autorisée que si les neutrinos sont leurs propres antiparticules. Pour la majeure partie des neutrinos de type Majorana, d'importantes phases de violation de *CP* sont possibles, ce qui ouvre de nouveau la voie à la possibilité d'expliquer l'asymétrie matière antimatière dans l'Univers. L'observation de la double désintégration β, sans émission de neutrinos permettrait d'établir de manière définitive la nature Majorana des neutrinos.

La petitesse de la masse des neutrinos est une énigme. Les neutrinos de type Majorana sont naturellement présents dans les théories privilégiées qui prédisent des neutrinos légers, en raison d'un couplage avec des neutrinos droits très massifs. Selon ce scénario, la compréhension de la physique des neutrinos légers permettrait d'élucider leur physique aux énergies plus élevées.

Il existe une observation très controversée de la double désintégration β sans émission de neutrinos, qui donnerait aux neutrinos des masses de l'ordre de 0,2 à 0,6 eV. Des observations plus concluantes, réalisées sur un plus grand nombre de noyaux, sont requises. La recherche de ces processus requiert de grands détecteurs utilisant les plus récents matériaux et techniques produisant un faible rayonnement parasite. Le faible rayonnement parasite dans l'environnement du SNOLab en fait un emplacement idéal pour effectuer de telles mesures. Les collaborations EXO

Carte de la partie centrale de l'île de Honshu, au Japon, indiquant les trajectoires suivies par les faisceaux de neutrinos pour les expériences K2K et T2K.

domaine nouveau et en croissance, stimulé par la confirmation par le SNO que les neutrinos ont une masse. Il est donc fort probable que de nouvelles découvertes passionnantes en physique seront faites au cours de la prochaine décennie.

Double désintégration β sans émission de neutrinos

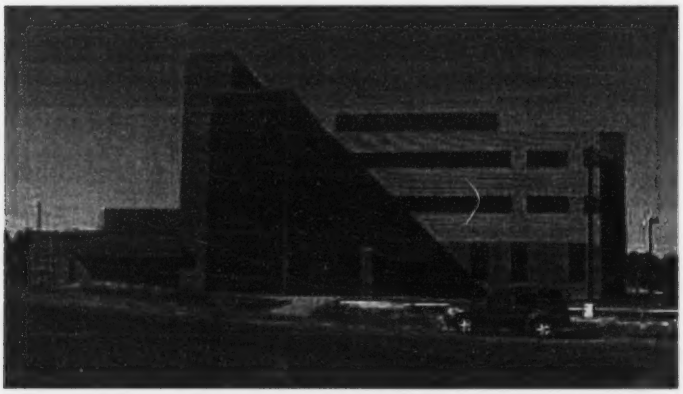
Si les expériences sur les oscillations des neutrinos, comme celles qui ont été réalisées au SNO, ont démontré que les neutrinos possèdent une masse, elles ne permettent pas de mesurer directement cette masse. Selon les limites supérieures provenant de mesures directes de la désintégration β du tritium, nous savons que $m_{\nu_e} < 2.2$eV. Cette valeur est encore beaucoup plus élevée que les masses prévues de neutrinos, et l'on a besoin de nouvelles techniques de mesure. Certains noyaux peuvent se désintégrer par double désintégration β sans émission de neutrinos, une réaction très rare. Le taux de réaction dépend de la masse du neutrino, et de nombreuses expériences sont réalisées partout dans le monde pour traquer cette réaction. Seuls quelques noyaux permettent les transitions énergétiques autorisées, et tout porte à croire que le taux de réaction est inférieur à une désintégration par kilogramme année, et qu'il est probablement de l'ordre d'une désintégration par tonne année. Ces études requièrent une compréhension fine des éléments de la matrice nucléaire, et à cette fin il faudra disposer des données fournies par les expériences au laboratoire ISAC et réaliser des progrès en théorie nucléaire.

La réaction n'est autorisée que si les neutrinos sont leurs propres antiparticules. Pour la majeure partie des neutrinos de type Majorana, d'importantes phases de violation de *CP* sont possibles, ce qui ouvre de nouveau la voie à la possibilité d'expliquer l'asymétrie matière antimatière dans l'Univers. L'observation de la double désintégration β, sans émission de neutrinos permettrait d'établir de manière définitive la nature Majorana des neutrinos.

La petitesse de la masse des neutrinos est une énigme. Les neutrinos de type Majorana sont naturellement présents dans les théories privilégiées qui prédisent des neutrinos légers, en raison d'un couplage avec des neutrinos droits très massifs. Selon ce scénario, la compréhension de la physique des neutrinos légers permettrait d'élucider leur physique aux énergies plus élevées.

Il existe une observation très controversée de la double désintégration β sans émission de neutrinos, qui donnerait aux neutrinos des masses de l'ordre de 0,2 à 0,6 eV. Des observations plus concluantes, réalisées sur un plus grand nombre de noyaux, sont requises. La recherche de ces processus requiert de grands détecteurs utilisant les plus récents matériaux et techniques produisant un faible rayonnement parasite. Le faible rayonnement parasite dans l'environnement du SNOLab en fait un emplacement idéal pour effectuer de telles mesures. Les collaborations EXO

et Majorana élaborent actuellement des expériences qui rechercheront la double désintégration β sans émission de neutrinos dans le xénon et le germanium, respectivement, et elles envisagent de mener leurs expériences au laboratoire SNOLab. Un premier objectif de ces expériences consistera à confirmer ou à réfuter les valeurs actuellement proposées. À plus long terme, l'objectif sera d'atteindre une sensibilité de l'ordre de 50 meV pour ce qui est de la masse effective des neutrinos.



Le nouvel édifice du SNOLab, à la surface, près de Sudbury, où l'on trouve des bureaux, des salles de réunion et des espaces pour les laboratoires.

4.3 Études en astrophysique nucléaire

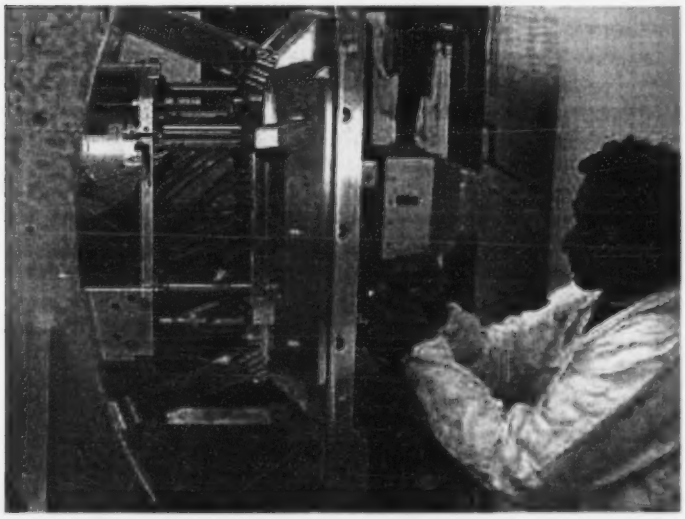
Les éléments lourds sont produits dans l'environnement nucléaire à température incroyablement élevée au cœur des étoiles et dans les explosions stellaires. Ces processus comprennent la production d'isotopes des plus exotiques à des températures très élevées. En recourant à des faisceaux radioactifs, on peut explorer cette immense « terra incognita » afin de comprendre les systèmes nucléaires complexes et les processus physiques qui prennent place dans les environnements stellaires. Un de ces domaines de recherche consiste à comprendre de façon détaillée la production d'énergie et la synthèse nucléaire dans les étoiles. Plus la masse d'une étoile est grande, plus les températures peuvent être élevées au cœur de l'étoile, ce qui a des conséquences cruciales sur les processus nucléaires qui s'y déroulent. Lorsque les températures sont de l'ordre de 10^6 K à 10^7 K, la production d'énergie se fait essentiellement par l'intermédiaire de la chaîne pp, qui convertit l'hydrogène en hélium. À des températures plus élevées, le ^{4}He se fusionne pour former du ^{12}C, et le cycle CNO produit la majeure partie de l'énergie. Puis nous assistons aux cycles Ne–Na et Mg–Al et enfin, à des températures de l'ordre de plusieurs 10^9 K, on atteint le point de combustion du ^{56}Ni/^{56}Fe. La fin de chaque cycle de combustion s'accompagne d'un effondrement partiel de l'étoile, et d'un réchauffement subséquent du noyau. Il est essentiel de comprendre tous ces processus pour parvenir à une compréhension fine de l'évolution des étoiles et des environnements explosifs que l'on retrouve dans les novæ et les supernovæ.

Les physiciens canadiens qui travaillent au laboratoire ISAC, à TRIUMF, jouent un rôle important dans ce domaine actif qui consiste à tester la matière dans des conditions extrêmes. L'installation ISAC se prête idéalement à ces expériences, et il comporte des détecteurs à la fine pointe de la technologie, y compris le spectromètre DRAGON unique en son genre, les installations TUDA et 8π, et TITAN. À ce programme se greffent des expériences en cours en Europe, mais l'installation ISAC est déjà reconnu comme l'un des principaux laboratoires mondiaux pour ce qui est de la production d'isotopes exotiques.

Une des grandes réalisations des physiciens canadiens a été de déterminer le taux de la réaction $^{21}Na(p,\gamma)^{22}Mg$, une réaction clé qui détermine l'abondance de ^{22}Na galactique produit dans les scénarios d'explosion, comme les novæ ou les sources de sursauts de rayons X. On croyait auparavant que la production de ^{22}Na serait suffisante pour qu'on puisse détecter par astronomie des rayons γ, via sa désintégration primaire. Toutefois, un dilemme majeur s'est présenté : ni le satellite COMPTON, ni le satellite INTEGRAL ne l'ont observée. Les mesures directes de cette réaction, réalisées à l'aide d'un faisceau de ^{21}Na et du spectromètre DRAGON au laboratoire ISAC, ont établi que le taux de la réaction $^{21}Na(p,\gamma)^{22}Mg$ est plus élevé que ce que l'on avait précédemment estimé. Il en découle que la production de ^{22}Na a eu lieu plus tôt dans la nova, d'où il a été en fait éliminé par la réaction $^{22}Na(p,\gamma)^{23}Mg$, conformément aux observations faites par les satellites de spectrométrie γ et selon le modèle standard de l'évolution stellaire.

De nouveaux détecteurs comme EMMA et TIGRESS, actuellement en construction et qui seront utilisés sur les faisceaux accélérés au laboratoire ISAC II, joueront un rôle clé dans ce programme et permettront à TRIUMF de demeurer à la fine pointe de ce domaine de recherche. Pour les travaux futurs, les spectromètres DRAGON, TUDA et TACTIC du laboratoire ISAC I seront utilisés pour les mesures en astrophysique nucléaire portant sur les systèmes légers et riches en protons ($A < 30$), et le spectromètre TITAN permettra de mesurer la masse des noyaux instables présentant un intérêt en astrophysique. Les spectromètres TIGRESS et EMMA utiliseront les faisceaux plus énergétiques d'ISAC II pour étudier les structures et les réactions des noyaux riches en neutrons, ce qui est nécessaire pour comprendre la production des éléments lourds dans la nucléosynthèse par capture rapide des neutrons.

La synergie entre les avancées en physique nucléaire expérimentale et théorique et l'astrophysique a déjà eu un impact majeur sur la façon dont nous comprenons la production de l'énergie dans la vie et la mort des étoiles. Les mesures qui sont prévues nous permettront de percer un peu plus encore les secrets de l'Univers.



Installation du premier détecteur de rayons gamma du nouveau spectromètre TIGRESS, mis au point pour l'installation d'ions radioactifs accélérés ISAC-II.

4.4 Études sur les structures nucléaires

La matière nucléaire forme la majeure partie de ce qui nous entoure. Aussi est-il ironique de constater qu'en raison de sa complexité les physiciens en savent plus au sujet des particules exotiques produites dans l'Univers primordial que sur la matière nucléaire elle même. Comprendre les interactions entre les nucléons des systèmes à N corps, comme le ^{208}Pb, d'après la dynamique sous jacente des quarks et des gluons, est un défi intellectuel et technique. Par le passé, on s'est surtout intéressé aux noyaux stables de divers numéros atomiques (Z), une vision « unidimensionnelle » de l'univers nucléaire. Les laboratoires de faisceaux radioactifs produisent et accélèrent des isotopes riches en neutrons et en protons, permettant d'obtenir des noyaux d'intérêt, de diverses valeurs Z et N (nombre de neutrons). Cette approche bidimensionnelle permet d'étudier divers noyaux exotiques, ce qui éclaire d'un jour nouveau les éléments de la structure nucléaire. Des phénomènes inattendus, comme la « peau » de neutrons, peuvent apparaître dans des noyaux très riches en neutrons. Dans des noyaux de faible masse, les neutrons peuvent former une sorte de halo – où certains neutrons de valence ont une étendue spatiale qui dépasse de beaucoup les dimensions nucléaires prévues. Un des premiers exemples de ce phénomène a été constaté avec le ^{11}Li : avec 3 protons et 8 neutrons, ce noyau est presque aussi gros que celui du ^{208}Pb, beaucoup plus massif!

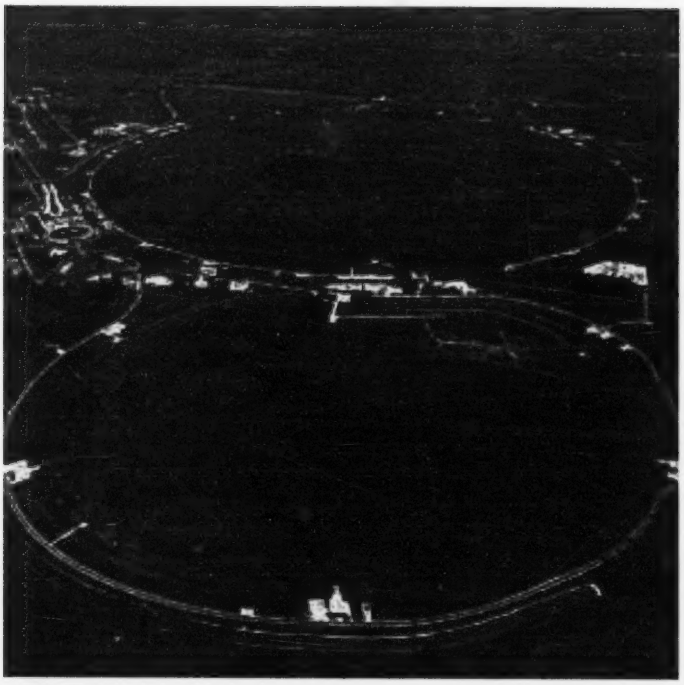
Au cours des cinq dernières années, le spectromètre 8π a été installé au laboratoire ISAC. Pourvu de détecteurs auxiliaires, c'est un dispositif unique optimisé pour l'étude des isotopes radioactifs. Un des premiers faits d'arme du spectromètre 8π a été la mesure de la désintégration β du ^{11}Li. Un résultat surprenant a été de constater que loin d'être « fragile », la structure du halo neutronique pouvait non seulement survivre à la désintégration β de ^{11}Li au ^{11}Be, mais également à l'émission d'un neutron du ^{11}Be, pour former le ^{10}Be. On pense que cette stabilité accrue est assurée par l'échange de modes de vibration de surface à faible fréquence du noyau, et la confirmation de ce mécanisme permettrait de comprendre le halo du ^{11}Li comme s'agissant d'une paire de Cooper neutronique isolée. Ces systèmes constituent donc un outil idéal pour comprendre l'origine des interactions d'appariement collectif dans les noyaux – le même mécanisme d'appariement qui se manifeste sous forme de supraconductivité dans les systèmes plus lourds.

Le futur programme d'étude de la structure nucléaire à ISAC sera centré sur le spectromètre 8π et sur TITAN pour la spectroscopie de la désintégration et les mesures de masse à ISAC I, ainsi que sur les spectromètres TIGRESS et EMMA actuellement en cours d'installation à ISAC II. Ces derniers spectromètres représentent une avancée majeure en technologie des détecteurs de rayons γ et en détection du recul des noyaux, et ils seront utilisés dans un vaste programme d'étude des réactions des structures nucléaires, qui mettra à profit les faisceaux radioactifs à hautes énergies produits par le nouvel accélérateur ISAC II.

4.5 Tests directs du modèle standard dans les collisionneurs

Tests précis de la force électrofaible aux collisionneurs LEP, HERA et Tevatron

Après deux décennies de tests poussés, la validité du modèle standard a été solidement établie. Aux hautes énergies, on prévoit d'observer une nouvelle physique, mais les tests précis réalisés à des énergies moindres permettent également de sonder les effets subtils de la physique au-delà du modèle standard. C'est pourquoi les physiciens canadiens ont déployé d'importants efforts aux collisionneurs HERA, LEP et Tevatron pour tester le modèle standard, mesurer les paramètres libres et chercher les preuves ou les indices d'une nouvelle physique.



Vue aérienne du Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) près de Chicago. L'injecteur principal (près de l'anneau) et le Tevatron sont clairement visibles.

Les paramètres du modèle standard ont fait l'objet de centaines de mesures effectuées dans le cadre des programmes réalisés à ces collisionneurs. Mentionnons notamment les mesures précises de la masse et de la largeur du Z^0 au LEP, qui ont permis de déterminer qu'il y a exactement trois familles de neutrinos actifs légers. La masse et la largeur du boson W ont également été mesurées avec une grande précision dans les expériences au LEP et au Tevatron. Le plus important résultat obtenu au Tevatron a été la découverte du quark top, avec une masse étonnamment élevée, soit 172,5 GeV. La masse du quark top est mesurée à une précision de près de 1 %, ce qui en fait la masse la mieux mesurée de tous les quarks. Combinées avec la masse du boson W, ces mesures permettent de définir les meilleures limites actuelles de la masse du boson de Higgs, et les résultats semblent favoriser une faible masse. Un important résultat obtenu au laboratoire HERA a été la démonstration de l'unification de la force électrofaible grâce à la mesure des courants chargés et neutres à des valeurs élevées de Q^2. De nouvelles données obtenues avec des leptons polarisés permettront de tester avec précision la nature chirale de ces interactions.

De nombreux tests précis ont été réalisés pour trouver des indices de nouvelle physique au-delà du modèle standard. Il s'agit notamment de la recherche de particules composites, d'états leptoniques excités, de combinaisons dites leptoquark et de grandes dimensions supplémentaires. On n'a trouvé aucune donnée corroborant l'une ou l'autre de ces hypothèses. On a également étudié le couplage des particules, toujours à la recherche d'une nouvelle physique. Par exemple, les couplages du boson W à ses partenaires neutres, le γ et le Z, sont sensibles aux écarts par rapport au modèle standard, mais aucun écart de cette nature n'a été constaté au LEP, au Tevatron ou à HERA.

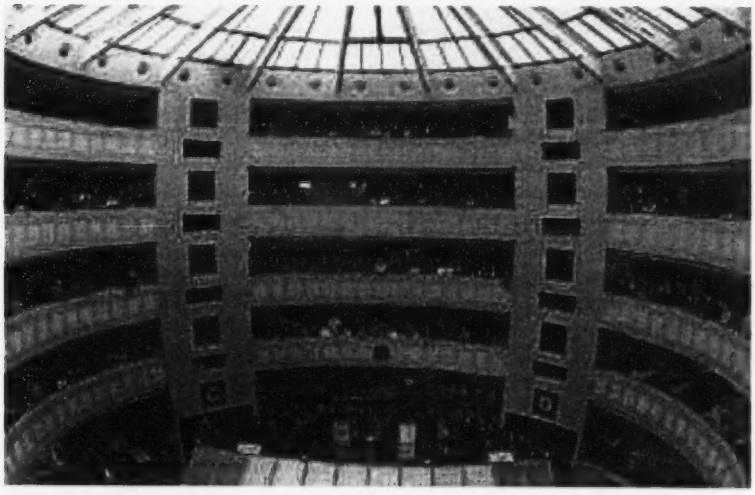
La participation canadienne aux expériences des collisionneurs LEP, HERA et Tevatron a été très fructueuse. Ces programmes ont permis de réaliser des découvertes nouvelles et passionnantes, et d'explorer et de raffiner davantage chaque aspect du modèle standard. Nous continuerons d'exploiter ce riche programme de physique jusqu'à la fin de la décennie. À mesure que les programmes prendront fin progressivement au Tevatron et à HERA, la participation au programme ATLAS s'intensifiera, avec à la clé la possibilité de découvertes passionnantes d'ici quelques années à peine.

Recherche du boson de Higgs et de la supersymétrie au LHC

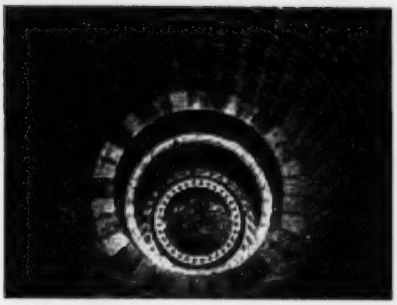
La construction du LHC est presque terminée, et on devrait obtenir les premières données d'ici la fin de 2007. Les collisions protons-protons auront une énergie dans le centre de masse de 14 TeV, suffisamment pour produire de nombreuses particules nouvelles. Un des principaux objectifs du programme consiste à trouver le boson de Higgs. Les données actuelles, notamment la masse du quark top, contraignent la masse et penchent fortement en faveur d'un boson de Higgs léger. S'il existe, le boson de Higgs pourrait être observé peu après la mise en service du LHC. L'expérience ATLAS sera sensible au boson de Higgs à une masse pouvant atteindre 1 TeV, soit bien au-delà des prévisions actuelles.

Les théories supersymétriques prédisent l'existence de nouveaux processus et de nouvelles particules à des énergies qui seront accessibles au LHC, et un des principaux objectifs de l'expérience ATLAS sera de trouver ces particules supersymétriques. D'autres théories et diverses extensions du modèle standard prédisent également de nouveaux états qui pourraient être observés par ATLAS, y compris des fermions excités, des objets composites et des leptoquarks. Par leur contribution active à l'expérience ATLAS, les physiciens canadiens seront au cœur de toutes ces recherches fort prometteuses.

Le lien entre volet théorique et volet expérimental est particulièrement important pour la physique qui sera réalisée au LHC. Les théoriciens ont joué un rôle essentiel dans l'identification des signatures expérimentales pointant vers une nouvelle physique au-delà du modèle standard, et dans l'optimisation du potentiel de découverte du LHC. Ce partenariat se poursuivra lorsque l'accélérateur entrera en service et que l'on commencera à interpréter les résultats nouveaux et passionnants.



Une partie des quelque 1 800 scientifiques du monde entier qui font partie de la collaboration ATLAS.



Vue du calorimètre hadronique bouchon (HEC) d'ATLAS, avant son installation. Le HEC a été construit au Canada et assemblé à TRIUMF.

Au-delà du modèle standard à l'ILC

L'expérience ATLAS permettra probablement de réaliser des découvertes révolutionnaires, mais celles-ci ouvriront à coup sûr la voie à de nouvelles questions. S'il semble que le boson de Higgs est probablement fort léger, selon le modèle standard, cette théorie prévoit naturellement des corrections de masse quantiques qui donneraient lieu à un boson de Higgs très lourd. Les théoriciens ont déjà postulé un vaste éventail de symétries qui expliqueraient pourquoi le boson de Higgs doit avoir une masse similaire à celle des bosons W et Z. C'est seulement en étudiant les nouvelles particules qui seront trouvées au LHC, en mesurant précisément leur masse et leur durée de vie et en déterminant avec grande précision leur couplage aux particules du modèle standard que nous pourrons déterminer quels sont les scénarios les plus plausibles parmi tous ceux qui ont été postulés en physique des particules.

Dans le collisionneur linéaire international (ILC) envisagé, des faisceaux d'électrons et de positrons se heurteront à des énergies atteignant 500 GeV, et permettront d'accéder à des états équivalant à une masse de 1 TeV. Comme les électrons sont des particules ponctuelles, les collisions sont plus « propres » que celles que l'on obtient avec les collisionneurs de hadrons, ce qui facilite grandement la mesure des masses et des rapports de branchement. Toutefois, les collisions protons-protons du LHC sont moins restrictives quant aux nombres quantiques des états initiaux, et conviennent donc à la détermination du spin des particules et de la hiérarchie des états associés à la production de nouvelles particules. Les approches complémentaires du LHC et de l'ILC seront essentielles pour clarifier pleinement la physique au-delà du modèle standard.

Comme nous le décrivons en détail dans les sections suivantes, les mesures précises des constantes de couplage, des masses et des symétries peuvent permettre de mieux comprendre la physique à des énergies bien supérieures à celles que l'on peut produire dans un collisionneur. L'ambition ultime de la physique des particules est de comprendre comment les différentes interactions – électrofaible et forte – peuvent être unifiées, et de les expliquer grâce à une seule théorie. Les mesures actuelles indiquent que cette unification des interactions ne se produit pas aux énergies inférieures à 10^{13} TeV. La précision qu'offrira le collisionneur ILC permettra de raffiner davantage les mesures des couplages prévues selon le modèle standard, et nous permettra d'extrapoler les prévisions avec suffisamment de précision pour limiter les possibilités d'unification des interactions. À moins que la physique qui existe entre les énergies actuelles et les énergies de l'ordre du TeV ne soit particulièrement simple, on ne pourra procéder avec fiabilité à ces extrapolations que grâce aux mesures que permettra le collisionneur ILC.

4.6 Tests indirects du modèle standard par des mesures précises

On peut également obtenir des résultats pointant vers une nouvelle physique grâce à des recherches indirectes. Les extensions proposées au modèle standard prévoient des écarts de symétrie petits mais mesurables, qui pourraient être les premiers indices d'une physique au-delà du modèle standard. Par conséquent, des mesures de haute précision des observables du modèle standard ou la recherche de phénomènes interdits ou supprimés dans le modèle pourraient être révélatrices d'une nouvelle physique. Bien que les résultats des recherches directes soient plus faciles à interpréter, les signatures indirectes d'une nouvelle physique permettent de sonder des énergies de l'ordre de plusieurs TeV, qui ne sont pas facilement atteintes même avec le LHC et l'ILC proposé.

Tests de la structure vectorielle axiale de l'interaction faible

Le modèle standard décrit les interactions faibles en termes de courants vectoriels et axiaux (V-A) gauches. Toutefois, en toute généralité, des interactions scalaires, vectorielles, pseudo scalaires, axiales vectorielles ou tensorielles droites ou gauches devraient être permises. L'observation d'interactions non V-A, ou courants droits, pourrait être indicative d'une nouvelle physique au-delà du modèle standard. Les données actuelles ne permettent pas d'interdire les termes non V-A avec une précision de plus de 10 %.

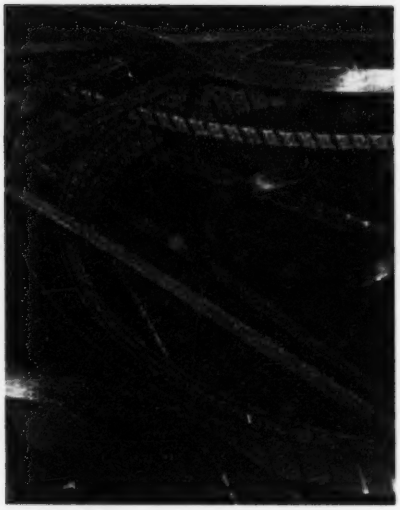
Il existe plusieurs méthodes complémentaires pour tester la structure V-A des interactions faibles. Des expériences réalisées à hautes énergies au LEP ont mesuré les paramètres de Michel qui décrivent la désintégration faible du lepton tau. Aux faibles énergies, les tests consistent à mesurer précisément les paramètres de Michel dans la désintégration de muons polarisés, dans l'expérience TWIST au TRIUMF. Cette recherche purement leptonique est très propre et permettra d'établir certaines des contraintes les plus strictes sur la forme V-A. Toutefois, les couplages et le mélange des interactions droites pourraient être tels que les recherches par l'étude de la désintégration β du neutron et des noyaux pourraient y être particulièrement sensibles. C'est pourquoi le programme TRINAT au laboratoire ISAC porte sur les désintégrations β nucléaires des atomes ^{38m}K, ^{37}K et ^{80}Rb. On y étudie également la corrélation angulaire β-ν pour contraindre le couplage possible des bosons scalaires aux quarks de première génération, qui sont privilégiés par certains modèles de Higgs non standard. Enfin, le rapport de branchement $\pi \rightarrow e\nu$ est très sensible aux couplages scalaires de nouvelles particules qui évitent la suppression de l'hélicité du couplage axial dominant. Les mesures de ce rapport en cours à TRIUMF, avec une précision de l'ordre de 0,1 %, permettraient entre autres d'explorer les échelles de masse des leptoquarks dans la région de 200 TeV.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Figure 3 : La matrice de mélange de quarks de Cabibbo Kobayashi Maskawa (CKM) qui régit le mélange des quarks par interaction faible.

Études de la matrice CKM

La matrice CKM (figure 3) décrit le degré de mélange dans le secteur des quarks. Les éléments de cette matrice représentent les forces de couplage faibles entre les quarks. Les éléments sont complexes, mais les contraintes d'unitarité limitent le scénario de trois générations de quarks à trois angles de mélange réel et à une phase complexe de violation de *CP*.



Câbles supraconducteurs utilisés dans des applications en physique des particules; les câbles supraconducteurs permettent au courant électrique de circuler sans résistance.

C'est en 1964 que l'on a montré pour la première fois que la symétrie *CP* était imparfaite, à l'aide de kaons. Pendant 30 ans, aucun autre cas de violation de *CP* n'a été observé, jusqu'à ce que l'expérience BaBar établisse récemment que cette symétrie est également violée chez les mésons B. On a appris à observer ce phénomène en comparant la désintégration du B^0 et de l'anti-B^0 dans l'état final J/ψ K_s et dans les modes connexes. L'expérience CDF au Tevatron a ensuite observé le mélange du méson B_s, ce qui a imposé des contraintes additionnelles importantes aux éléments de la matrice CKM.

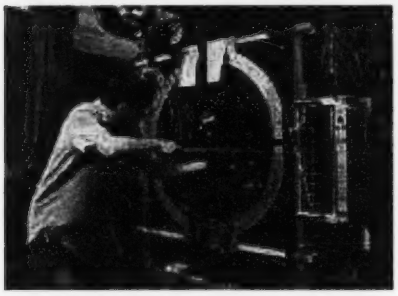
Les éléments de la matrice CKM doivent être déterminés par la mesure des taux de désintégration, des rapports de branchement et des masses, et ces expériences doivent être faites de diverses façons afin de tenir compte de tous les couplages des quarks. Un des objectifs du programme portant sur les quarks à saveurs lourdes consiste à faire suffisamment de mesures pour surcontraindre les paramètres de la matrice CKM, ce qui constitue un test sensible du modèle standard, et pourrait pointer vers une nouvelle physique qui serait directement observable au LHC ou ailleurs.

Les expériences en physique nucléaire permettent de définir V_{ud}, l'élément le plus précisément mesuré dans la matrice CKM, grâce à l'étude des transitions par désintégration β $0^+ \rightarrow 0^+$ superpermises. L'expérience canadienne à piège de Penning, à l'Argonne National Laboratory, a contribué à ce programme par des mesures de masse d'une grande précision, tandis que le spectromètre 8π et le compteur de 4π de désintégrations β au laboratoire ISAC ont permis de réaliser des mesures hautement précises des rapports de branchement et des durées de vie des émetteurs lourds superpermis ^{62}Ga et ^{74}Rb. Grâce au nouveau détecteur TITAN, l'installation ISAC sera dans une position unique pour mesurer les trois quantités requises (taux de désintégration, rapports de branchement et masses) et il ajoutera plusieurs nouveaux scénarios hautement précis aux données mondiales sur les transitions superpermises. On peut également calculer l'élément de matrice V_{ud} en mesurant la désintégration β du neutron à l'aide de neutrons froids.

Un aspect important du programme d'étude de la désintégration β superpermise a trait à sa forte collaboration avec les théoriciens nucléaires, afin d'évaluer les corrections radiatives et dépendantes de l'isospin qu'il faut apporter aux valeurs expérimentales. L'apport canadien dans le domaine de la désintégration β superpermise illustre bien comment l'étroite collaboration entre la physique théorique et expérimentale permet d'obtenir des résultats précis qui ont une grande incidence en physique subatomique.

Études de la violation de la parité

Les scientifiques canadiens participent également à des mesures de haute précision des symétries de violation de la parité dans les systèmes hadroniques, leptoniques et atomiques. Ces travaux visent à rechercher des structures d'interaction faible, au-delà du modèle standard, grâce à la mesure précise de la dépendance en énergie (« mobilité », ou running) de l'angle de mélange faible $\sin^2\theta_W$ aux basses énergies. Les expériences prévues au cours des prochaines années permettront de tester les prévisions du modèle standard jusqu'à une précision de 25σ. Ces expériences sont sensibles à diverses corrections radiatives électrofaibles, et constitueraient des tests complémentaires aux expériences réalisées aux échelles de masse de l'ordre du TeV. Au laboratoire JLab, les Canadiens jouent un rôle majeur dans l'expérience *Q*weak, qui consiste à mesurer pour la première fois avec précision la « charge faible » du proton, $Q^p_{weak} = 1 - 4\sin^2\theta_W$. Cette précision sera de 0,3 % pour $\sin^2\theta_W$. Un programme complémentaire, auquel participent des Canadiens, étudiera le paramètre $\sin^2\theta_W$ en mesurant précisément la charge faible de l'électron, programme qui se déroulera au JLab après la mise à niveau à 12 GeV prévue plus tard au cours de la présente décennie. Le caractère mobile de $\sin^2\theta_W$ peut également être étudié à l'aide des processus de violation de la parité atomique. Les expériences prévues à ISAC utiliseront des isotopes de francium, que l'on comprend bien théoriquement, et qui présentent une grande amplitude de violation de parité.



Insertion d'une source dans le détecteur Crystal Ball, afin de procéder à un étalonnage énergétique. Le détecteur Crystal Ball est utilisé à Mainz (Allemagne) par une collaboration de physiciens, dont certains proviennent de la Mount Allison University.

Mesures du dipôle électrique

Les moments dipolaires électriques permanents (EDM) changent de signe sous inversion de la parité et du temps et, dans le cas d'une particule élémentaire, d'un atome ou d'une molécule, ils ne peuvent se manifester que s'il y a polarisation du système par des interactions violant la symétrie T ou, de façon équivalente, la symétrie *CP*. Une mesure non nulle démontrerait une nouvelle interaction violant la symétrie *CP*. De nouvelles sources de violation de *CP* sont requises pour expliquer l'asymétrie cosmique observée entre matière et antimatière. Toutes les extensions du modèle standard actuellement privilégiées comportent intrinsèquement des phases de violation de *CP*, qui donnent lieu à des moments EDM importants pour les particules. Les limites actuelles pour l'électron, le neutron et l'atome ^{199}Hg ont déjà exclu de grandes parties de l'espace paramétrique de ces modèles, et une amélioration importante au-delà des limites actuelles de précision des EDM aurait des conséquences profondes sur l'ensemble des extensions viables du modèle standard et, en définitive, sur la violation de symétrie *CP*.

Les noyaux présentant des déformations octopolaires collectives accroissent les moments EDM atomiques induits par une interaction sous jacente qui viole la symétrie *CP*, et on prévoit qu'elles sont plus fortes pour les noyaux avec $A \sim 225$. Grâce à la mise en place d'une cible de production d'actinide au laboratoire ISAC, tout sera en place pour produire de manière exceptionnelle des faisceaux intenses comportant de tels noyaux, ce qui donnera la possibilité d'améliorer grandement les limites de mesure des EDM pour les particules. Une expérience prévue, qui

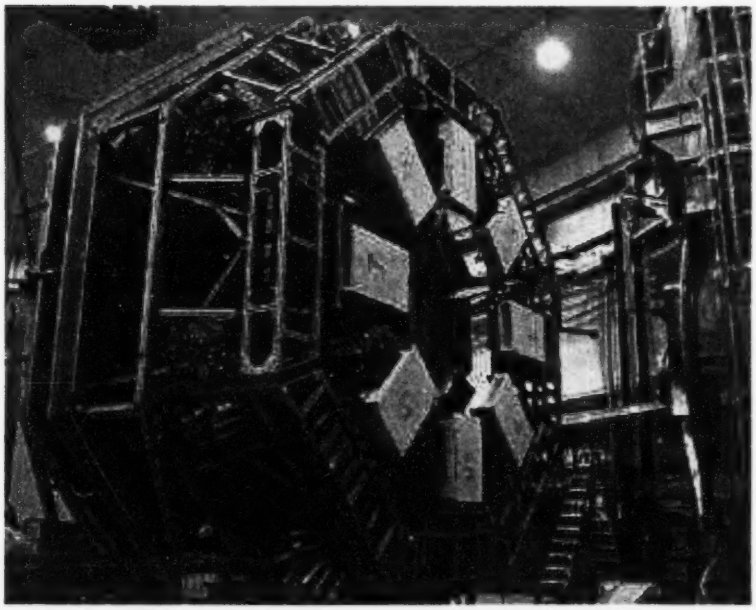
utilisera le ^{223}Rn, vise à améliorer d'au moins un ordre de grandeur les limites actuelles de précision de la violation de *CP* qui ne modifie pas la saveur des particules. On pourra ainsi soit détecter un moment EDM de particule non nul, soit contraindre grandement la violation de *CP* responsable de la baryogénèse dans l'Univers primordial.

4.7 Chromodynamique quantique

La chromodynamique quantique (CDQ) est le cadre théorique qui décrit les interactions des quarks et des gluons. Aux hautes énergies, l'intensité de l'interaction forte est suffisamment faible pour permettre des calculs en CDQ par la méthode des perturbations. Les prévisions de la CDQ dans ce domaine d'énergie ont été testées abondamment. Les expériences qui étudient les interactions de diffusion des quarks aux hautes énergies sont en bon accord avec les calculs de la CDQ. Aux faibles énergies, les calculs de la CDQ ne sont pas aisés, et dans ce régime d'énergie on a recours, pour établir les prévisions, à des modèles et à des techniques computationnelles comme la CDQ sur réseau. Des progrès considérables ont été réalisés dans ce domaine, qui permettent d'établir des prévisions robustes du confinement des quarks et de bien comprendre le spectre observé des hadrons. Dans les sections suivantes, nous décrivons en détail les programmes de recherche dans ces deux régimes de la CDQ.

Études dans le régime perturbatif

La constante de couplage de l'interaction forte α_s a été mesurée au LEP, au Tevatron et à HERA à diverses échelles d'énergie, ce qui confirme le caractère mobile de α_s, c. à d. que l'intensité des interactions fortes diminue lorsque le transfert de quantités de mouvement augmente, ce qui valide le scénario de la CDQ en régime perturbatif. Les expériences réalisées au Tevatron et à HERA ont

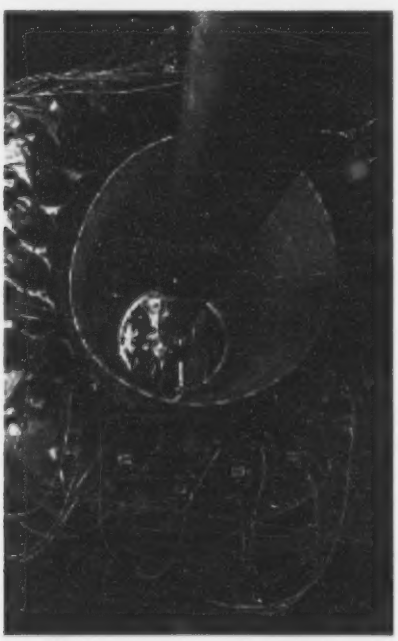


L'expérience G0, qui se déroule dans le hall C du Jefferson Laboratory, vise à étudier le quark étrange qui est l'un des composants du proton. La structure de montage et 75 % des détecteurs de rétrodiffusion de l'expérience G0, illustrés ici, ont été conçus par des physiciens canadiens et construits à TRIUMF.

testé la CDQ à un degré élevé de précision dans divers domaines, par la mesure des sections efficaces des jets qui émergent avec des quantités de mouvements élevées, caractéristiques de collisions à courtes distances. Si ces mesures s'écartent des prévisions du modèle standard, cela pourrait également être indicatif d'une nouvelle physique. Les états finaux à jets multiples peuvent également être révélateurs d'une nouvelle physique, car les objets lourds peuvent se désintégrer en jets, et ces mesures constituent un test strict pour les calculs de la CDQ aux ordres élevés. Les mesures des états finaux à jets multiples feront partie des premières contributions de l'expérience ATLAS, qui étudiera ce phénomène à des énergies bien au-delà de celles qui ont été étudiées aux collisionneurs Tevatron et HERA.

La physique du quark bottom a un rôle spécial en CDQ. Dans les régions où α_s n'est pas faible, les prévisions quantitatives de la CDQ se révèlent difficiles. La masse du quark bottom est suffisamment élevée pour vaincre cette difficulté, mais suffisamment faible pour que le Tevatron puisse en produire abondamment. Les mesures réalisées au Tevatron et à HERA ont donné, pour le quark bottom, des sections efficaces plus grandes que ne le prévoyait la théorie, ce qui a incité les théoriciens à revoir leurs calculs pour comprendre la cause de cet écart.

L'objectif premier des chercheurs canadiens qui participent à l'expérience ZEUS à HERA a été de décrire la composition du proton (fonction de structure). HERA a élargi la plage de Q^2 (carré du transfert de quantité de mouvement du boson échangé) et x (quantité de mouvement fractionnaire du quark heurté), couvrant un intervalle près d'un facteur 10^6 pour les deux variables. Les ajustements combinés électrofaible et CDQ à HERA ont permis de mesurer la fonction de structure avec une précision de l'ordre de 1–2 % dans la région des faibles valeurs de x. Les mesures de l'asymétrie de charge du boson W au Tevatron ont contraint le rapport des quarks d / u dans la région des valeurs élevées de x, où il y a eu peu d'expériences et donc peu de données. Les séries de données accrues provenant de HERA et du JLab, après sa mise à niveau, aideront à résoudre les incertitudes restantes dans notre connaissance de la fonction de structure aux grandes valeurs de x. L'extrapolation des fonctions de structure, jusqu'à la plage cinématique du LHC, constitue la base pour prévoir les sections efficaces des particules qui seront observées au LHC.



Un travailleur jette un coup d'œil dans le cylindre du faisceau d'électrons au Jefferson Laboratory, où de nombreux chercheurs canadiens en physique subatomique effectuent des expériences.

Études dans le régime non perturbatif

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, la compréhension quantitative du confinement demeure un problème encore non résolu de la CDQ. Une question importante à cet égard est celle de la structure des hadrons. Peut-on comprendre quantitativement les propriétés du nucléon, comme la masse, le spin, les polarisabilités, la charge et la répartition des courants en termes de quarks et de gluons sous jacents, dans le cadre conceptuel de la CDQ? Des progrès considérables ont récemment été réalisés sur le front théorique afin de résoudre ce problème. Les symétries de base de la CDQ, surtout la symétrie chirale, ont été exploitées pour développer des « théories des champs effectifs » capables de donner des prévisions spécifiques de la structure des hadrons et de leurs interactions aux faibles énergies (p. ex., polarisabilités électrique et magnétique des nucléons et interactions pions nucléons). Des avancées analytiques et computationnelles récentes ont permis d'améliorer les calculs, que l'on peut maintenant appliquer avec grande certitude dans le secteur des quarks légers. La collaboration High Precision QCD* (HPQCD), à laquelle participent des théoriciens canadiens, américains et britanniques, a joué un rôle majeur dans le raffinement des calculs.

Les expérimentateurs canadiens participent activement à plusieurs études de la structure et de la dynamique des hadrons, à l'aide de sondes électromagnétiques. Mentionnons par exemple l'étude du méson π^+, un des plus simples systèmes hadroniques dont le facteur de forme (F_π) est calculable en CDQ perturbative. Toutefois, on ne connaît pas encore en détail la transition du régime perturbatif au régime non perturbatif. En raison du faible nombre de quarks de valence dans le pion, on prévoit que cette transition sera plus facile à observer que dans tout autre système, et donc que la mesure de F_π serait un test important de notre compréhension de la CDQ dans les systèmes liés. Les études visant à mieux comprendre les modèles de la structure des hadrons, basés sur la CDQ, progressent également. L'expérience *G0*, actuellement en cours au JLab, permettra de quantifier la contribution de la mer des quarks étranges à la structure du proton, en mesurant les facteurs de forme électrique et magnétique étranges du proton, ce qui nous permettra de mieux comprendre la contribution des quarks s virtuels à la masse et au spin du proton. Selon les premiers résultats, la contribution des quarks étranges à la structure du proton est faible mais non nulle.

La CDQ prévoit une variété d'états liés exotiques dans lesquels les gluons peuvent contribuer aux états quantiques des particules, voire former des particules purement « gluoniques ». Les premiers états sont dits hybrides, les deuxièmes sont appelés « boules de gluons ». La recherche de nouveaux hadrons lourds est d'ailleurs un domaine de recherche actif à BaBar et ailleurs car ils permettraient de tester les modèles de CDQ pouvant prévoir le spectre de telles résonances. Selon plusieurs indices fort prometteurs, certains de ces états pourraient être hybrides (gluon quark antiquark), ou encore des combinaisons diquark antidiquark. On peut représenter les mésons hybrides comme des états liés dont le gluon est un constituant. Une autre représentation intéressante est celle d'un « tube de flux gluonique » qui se forme entre la paire $q\bar{q}$ dans un méson, donnant lieu à une force entre couleurs qui est constante même lorsque la distance entre les quarks varie. Des calculs récents en CDQ sur réseau corroborent cette idée de formation de tubes de flux et leur comportement avec la distance croissante entre les quarks, ce qui souligne davantage le rôle non insignifiant des gluons en CDQ, dans la région de confinement. L'expérience GlueX constituera d'ailleurs un volet important du programme expérimental du JLab après sa mise à niveau à 12 GeV. Les objectifs scientifiques de l'expérience GlueX sont de prouver l'existence des mésons hybrides exotiques en déterminant leurs nombres quantiques J^{PC} particuliers, de mesurer leurs masses et leurs canaux de désintégration, et d'établir le spectre de ces particules.

---

* QCD est l'acronyme anglais pour Quantum Chromodynamics.

Au cours des dernières années, les théoriciens canadiens ont grandement contribué au domaine de la spectroscopie des hadrons. Ils ont permis de mieux comprendre les propriétés des saveurs et la violation de *CP* dans le secteur *B*, d'interpréter et de diagnostiquer certains tests de nouveaux mésons tout à fait inhabituels découverts ces dernières années, et ils ont joué un rôle clé dans l'établissement de nouvelles méthodes permettant de gérer les calculs très difficiles en électrodynamique quantique et en chromodynamique quantique.

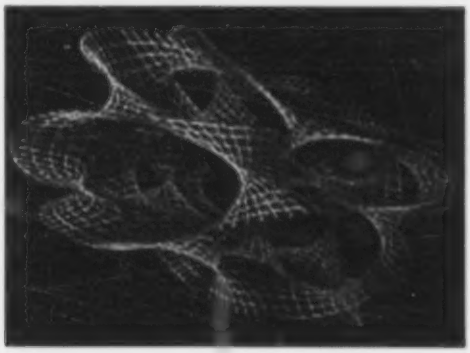
Bref, si la CDQ est maintenant sans équivoque la théorie fondamentale des interactions fortes, notre compréhension demeure néanmoins lacunaire dans plusieurs domaines cruciaux. Les techniques de modélisation des dernières décennies ont été remplacées par des méthodes théoriques rigoureuses utilisant la théorie des champs effectifs et la CDQ sur réseau. Alliées à des données précises, ces méthodes nous permettront de participer à une révolution dans notre compréhension de la CDQ.

4.8 Conséquences cosmologiques : recherche de la matière noire et théorie de cordes

Dans l'Univers, la matière « classique » est bien décrite par la CDQ dans le cadre du modèle standard. Toutefois, on ne sait pas si la majeure partie de la matière dans l'Univers est d'un type autre, qui nous est complètement inconnu. L'ensemble des physiciens subatomiques, des cosmologues et des astronomes estiment que les questions touchant la matière noire et l'énergie noire sont de la plus grande importance.

Sur le plan théorique, un nombre croissant de travaux qui jettent des ponts entre la théorie des cordes, la cosmologie et la phénoménologie visent à élucider ce profond mystère. Le Canada compte sur un nombre croissant de théoriciens réputés dans le nouveau domaine de la cosmologie des supercordes. La nouvelle théorie, décrivant l'Univers primordial qui est en train d'émerger pourrait expliquer pourquoi nous vivons exactement dans trois dimensions spatiales étendues. Des travaux récents jettent une lumière nouvelle sur la distribution observée à grande échelle de la matière dans l'Univers.

D'importantes expériences ont cours dans le monde entier afin de trouver des preuves directes de l'existence de la matière noire. Les candidats retenus qui permettraient d'expliquer la matière noire sont les particules dites WIMPS. Ces particules se manifestent dans les modèles supersymétriques, et on pourrait les détecter en mesurant le recul de la matière normale après sa diffusion par des WIMPS. On prévoit que le taux de ces événements sera très faible, de l'ordre de quelques événements par année par tonne de matériau cible. Les expériences planifiées pour le SNOLab joueront un rôle majeur dans cette recherche. La clé



Simulation sur ordinateur d'un espace-temps multidimensionnel.

du succès, dans ces expériences, consiste à réduire autant que faire se peut le rayonnement parasite. Grâce à sa grande profondeur et à l'extrême propreté de sa construction, le SNOLab sera le meilleur endroit au monde pour ce type de recherche. On ignore pour le moment si les interactions des WIMPS avec la matière conventionnelle sont dépendantes ou non du spin. Il faudra donc utiliser différents matériaux cibles pour tester les deux possibilités.

Un vigoureux programme de recherche est prévu au SNOLab, et les chercheurs ont obtenu l'approbation initiale pour l'installation des expériences SuperCDMS, PICASSO et d'un prototype du détecteur DEAP. L'expérience CDMS est bien établie et continuera d'être à la fine pointe des recherches mondiales au cours des prochaines années. Il n'est pas possible de construire un détecteur de type CDMS de grande taille, et de nouvelles technologies sont donc requises pour étudier les modes de dépendance ou d'indépendance à l'égard du spin. Deux projets canadiens sont particulièrement intéressants à cet égard. Le détecteur PICASSO utilise une technique unique qui lui permet de rechercher les interactions dépendantes du spin, en utilisant des détecteurs à gouttelettes liquides. Les résultats les plus récents obtenus par PICASSO établissent les meilleures limites mondiales pour ce qui est des taux d'interaction des WIMPS, dans quelques unes des plages de masse permises pour ces particules. L'expérience PICASSO procède actuellement à l'installation d'un détecteur de plus grandes dimensions, doté d'une sensibilité accrue, qui établira les meilleures limites mondiales pour la recherche des interactions dépendantes du spin et qui permettra de tester les prévisions théoriques au sujet des taux d'interaction des WIMPS. Un autre projet canadien passionnant, actuellement en phase de R et D, est le projet DEAP, qui consiste à utiliser de l'argon liquide comme matériau cible pour détecter la matière noire indépendante du spin. Cette technique a l'avantage de permettre d'utiliser un signal de discrimination des formes d'impulsions, possible avec l'argon, pour éliminer le rayonnement de fond résiduel de faible intensité. On construit actuellement un prototype de 10 kg afin de l'installer rapidement au SNOLab. La technique permettra de passer de façon très rentable à un détecteur de grande taille, de l'ordre de 1 000 kg.

Selon les modèles cosmologiques du Big Bang, l'abondance de matière noire s'explique si les masses des particules qui la composent sont bien en deçà de l'échelle des TeV; le cas échéant, on pourrait les produire dans des accélérateurs terrestres, comme le LHC, au cours de la prochaine décennie. La plus légère des particules supersymétriques est un candidat particulièrement prometteur comme particule WIMP. Les recherches pour les candidats supersymétriques et à la matière noire sont d'ailleurs l'un des principaux objectifs du programme ATLAS. Le défi ici sera d'établir les chaînes de désintégration qui mènent au candidat supersymétrique le plus léger, permettant ainsi de différencier les candidats ayant les caractéristiques requises de ceux qui ne les ont pas.

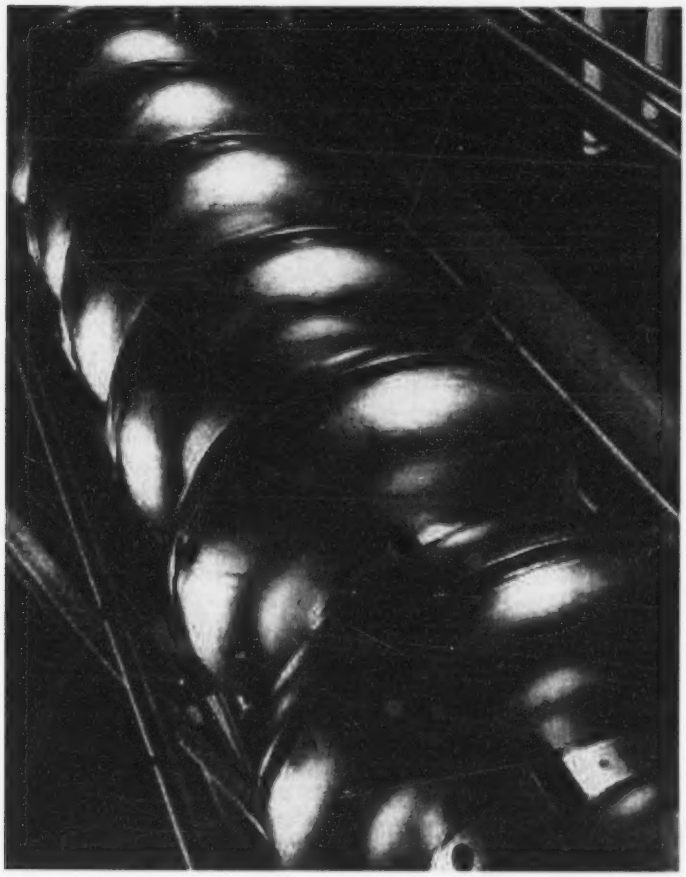
Il serait également possible d'observer indirectement la matière noire. Les particules WIMPS qui se diffusent dans les corps massifs comme la Terre ou le Soleil peuvent y être gravitationnellement liées. Au fil du temps, elles pourraient devenir suffisamment nombreuses pour que leurs produits d'annihilation soient observés par des télescopes en spectroscopie gamma, comme VERITAS.

Les données qui seront tirées de toutes ces mesures permettront d'élucider, du moins l'espère-t-on, la nature de la matière noire et de la supersymétrie. Grâce à la participation des chercheurs canadiens aux programmes complémentaires ATLAS, SNOLab et VERITAS, notre pays est bien placé pour être un chef de file dans la recherche de la matière noire et des particules supersymétriques. La synergie potentielle entre les observations cosmologiques et la production terrestre de particules de matière noire est une possibilité des plus fascinantes. Les découvertes de cette nature seraient des percées tout à fait colossales.

4.4 Perspectives

L'entrée en activité imminente du LHC suscite un enthousiasme considérable au sein de la communauté de physique subatomique puisque les réponses aux questions fondamentales qui sont demeurées en suspens depuis des décennies pourraient bientôt être à portée de main. Parmi ces questions, celle sur l'origine de la masse des particules élémentaires et la nature des extensions futures du modèle standard, dont la supersymétrie et les dimensions supplémentaires. Nombre des nouvelles particules prédites par ces théories devraient être à la portée du LHC et les scientifiques canadiens participant à ATLAS sont impatients de voir les premiers résultats.

Outre les recherches sur le boson de Higgs et la physique au-delà du modèle standard, ATLAS permettra de réaliser de nombreuses autres mesures, entre autres l'exploration de la chromodynamique quantique à de nouvelles échelles d'énergie, la mesure des processus de quarks lourds rares et la physique sous jacente à la matrice CKM, des tests de précision du modèle standard comme la mesure du couplage à trois bosons de jauge et de la masse du *W*, l'exploration des nouvelles frontières de la physique des ions lourds relativistes, etc. L'envergure des travaux de physique qui seront accomplis par ATLAS est un facteur qui motive et stimule fortement les universitaires et les scientifiques participant au projet au Canada.



Structures d'accélérateur supraconductrices constituées de niobium et mises au point dans le cadre des travaux de recherche en vue de la construction d'un collisionneur linéaire.

La recherche de la matière noire est un exemple de synergie tant en physique subatomique que dans d'autres domaines. La preuve de l'existence de la matière noire est à l'heure actuelle liée à l'astrophysique et est en grande partie indirecte. La détection directe des particules qui constituent cette matière constituerait une contribution considérable de la physique subatomique à notre connaissance de l'Univers dans son ensemble. Or, l'une des clés de ce programme expérimental est un laboratoire offrant un rayonnement parasite minimal. SNOLab serait donc le meilleur emplacement au monde pour ces expériences. La matière noire peut également être observée indirectement au moyen de télescopes à rayons gamma très énergétiques, comme VERITAS. Les résultats de ces deux programmes, associés aux recherches complémentaires sur la supersymétrie avec ATLAS, contribueront à élucider la nature de ce profond mystère.

L'énigmatique neutrino a été une source constante de surprises. Faisant fond sur le succès de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury, un programme très étoffé de physique des neutrinos est prévu. L'expérience sur les oscillations de neutrinos sur longue distance est actuellement en cours de construction au T2K. On y explorera le mélange, et peut être la violation de *CP*, dans le secteur des neutrinos. Au SNOLab des expériences sur la double désintégration β sans émission de neutrinos ont été proposées qui seraient suffisamment sensible pour mesurer la masse absolue des neutrinos et déterminer s'il s'agit de neutrinos de Majorana ou de Dirac. Si l'histoire se répète, l'étude des neutrinos devrait déboucher sur une foule de nouvelles découvertes.

Le travail de fond a été effectué pour qu'on puisse commencer à exploiter la physique au laboratoire ISAC de TRIUMF et il commence à porter fruit. ISAC est la principale installation mondiale de faisceaux radioactifs et les faisceaux radioactifs récemment mis en service permettront de réelles avancées pour l'étude des structures nucléaires et l'astrophysique nucléaire. Un programme complet de tests du modèle standard et de recherches pour la physique au-delà du modèle standard utilisant des noyaux exotiques est également en cours ou en préparation à ISAC.

Au Canada, les théoriciens ont fait d'importantes contributions à notre compréhension de la physique subatomique. Les théoriciens canadiens jouissent d'une renommée internationale, et sont réputés pour leur excellence, à la fois pour la production de travaux de recherche de pointe et pour la formation d'étudiants, qui sont nombreux à occuper des postes de premier ordre partout dans le monde. Nombre de ces théoriciens ont déjà formulé des idées qui seront testées par la prochaine génération d'expériences susmentionnées. Ils continueront à travailler à l'avant garde de la théorie subatomique, laquelle couvre l'ensemble des recherches en physique nucléaire et en physique des particules.

L'avenir de la physique aux frontières de l'énergie après le LHC passera par le collisionneur linéaire international (ILC), qui permettra de dresser avec finesse la chronologie du Big Bang. Si l'on découvre un ou plusieurs bosons de Higgs, des particules supersymétriques ou des WIMPS au LHC, le collisionneur linéaire prendra par la suite le relais pour explorer en détail les mécanismes de production – les masses, les interactions des particules, voire le pourquoi de l'existence des bosons de Higgs. Il jettera de la lumière sur la matière noire et sondera de nouvelles particules et de nouvelles symétries. Les Canadiens sont bien placés pour être des chefs de file dans le programme passionnant de physique qui se déploiera au cours des cinq à dix prochaines années. De même que nous avons fait des investissements pour mettre sur pied le SNO, ISAC et ATLAS au cours des dix dernières années, afin de préparer l'actuelle série d'expériences, il nous faudra investir dans la R et D pour les détecteurs et l'accélérateur de l'ILC au cours des cinq prochaines années pour être des participants à part entière à la physique aux frontières des hautes énergies au cours de la prochaine décennie et au-delà.

5
Les retombées économiques de la physique subatomique

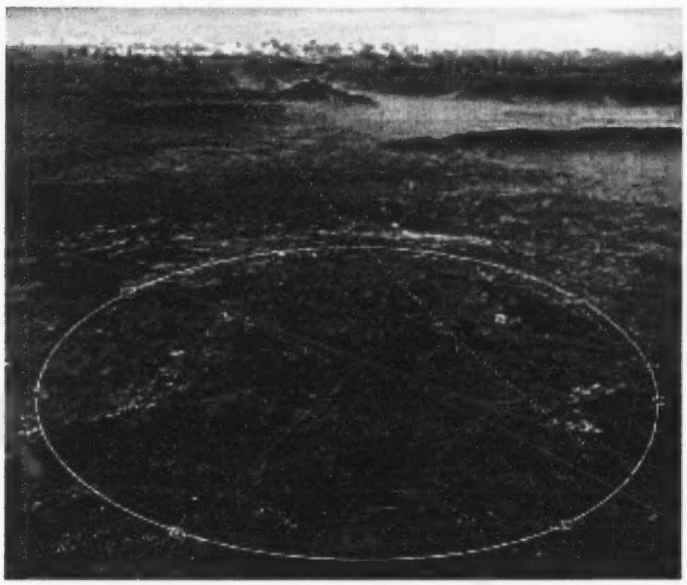
L'économie canadienne est en proie à d'importants changements alors qu'elle passe d'une économie tributaire des ressources naturelles à une économie fondée sur le savoir. Le Canada a besoin d'une communauté scientifique puissante et féconde, capable de transmettre son savoir faire à l'industrie canadienne et de former des personnes hautement qualifiées. En outre, la recherche fondamentale d'aujourd'hui conduit aux technologies de demain, qui seront essentielles à la compétitivité du pays. En particulier, le Canada doit demeurer à l'avant garde de la recherche en physique subatomique. Cette recherche repousse les frontières de la connaissance et, ce faisant, jette les bases de nouvelles technologies dans les domaines des sciences physiques et des sciences de la vie, qui modifieront nos modes de transport, nos communications et notre vie professionnelle. Les retombées économiques de la physique subatomique sont nombreuses et incluent non seulement les avantages technologiques de la recherche proprement dite mais également la formation de personnes hautement qualifiées qui enrichiront la société dans une foule de domaines souvent imprévisibles. Dans la présente section, nous résumons les avantages économiques de la recherche en physique subatomique.

5.1 Retombées technologiques

Les expériences modernes en physique subatomique sont exigeantes et nécessitent habituellement des innovations pour que l'on puisse réaliser des mesures jugées auparavant infaisables. Par exemple, le but d'une expérience peut être de mesurer la désintégration rare d'une particule subatomique ou d'un isotope radioactif, de façon à tester une théorie en vogue. Une telle expérience peut nécessiter une méthode nouvelle pour supprimer les sources de rayonnement parasite ou un détecteur atteignant une résolution inconnue jusqu'alors, de façon à isoler un

événement unique parmi une multitude d'autres événements. En raison de ces contraintes scientifiques, les expériences en physique subatomique stimulent la technologie des détecteurs et des appareils électroniques et ces innovations conduisent souvent vers de nouvelles technologies au bénéfice de la société.

Il n'est pas aisé, la plupart du temps, de chiffrer les retombées indirectes mais extrêmement importantes des instruments de la physique subatomique pour la société. Comme le déclare Rosenberg[3], le transfert d'instrumentation est « particulièrement intense de la physique à la chimie, de même que de la physique et de la chimie à la biologie, à la médecine clinique et, en bout de ligne, à la prestation de soins de santé. » Un bon exemple de ce transfert technologique nous est fourni par les accélérateurs inventés pour faciliter l'étude des interactions des particules subatomiques. Conçus à l'origine pour la recherche fondamentale, les accélérateurs sont maintenant utilisés à l'échelle planétaire pour diverses applications comme le traitement du cancer, l'étude de la structure des virus, la conception de nouveaux médicaments et la fabrication des semiconducteurs et des puces. À cet égard, le Centre canadien de rayonnement synchrotron, récemment mis en service à Saskatoon, constitue un cas exemplaire puisqu'il tire son origine de la physique subatomique et que les applications auxquelles il sera voué ressortissent à de nombreux autres domaines, à la fois fondamentaux et appliqués. Parmi les autres exemples de retombées appréciables de la recherche en physique subatomique, mentionnons la médecine nucléaire et les instruments de diagnostic médical comme l'IRM. Le Web est un autre exemple de retombée de la physique subatomique. Le Web a été développé au CERN pour permettre aux physiciens des hautes énergies de travailler ensemble plus efficacement, en particulier en raison de la nature largement coopérative et internationale de la physique subatomique. Au moment où il a été inventé, on ignorait complètement que le Web révolutionnerait le mode de communication, l'enseignement et le commerce, mais aujourd'hui, son effet sur la société est indéniable. Il est souvent notre première source de nouvelles, de distraction et d'information.



Vue aérienne du site du CERN, près de Genève (Suisse). Le grand cercle blanc représente l'emplacement du tunnel du LHC, à environ 50 m sous la surface.

[3] Voir la section 9.2 qui indique les études relatives à cette section du rapport.

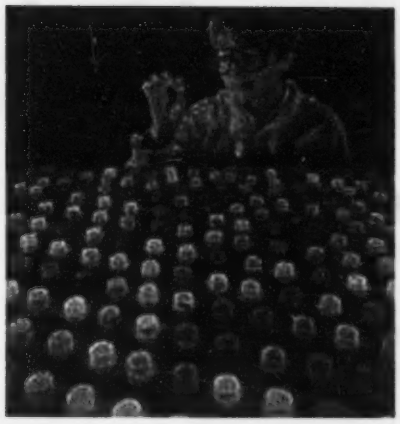
Mais en dépit de ses avantages, la recherche fondamentale est vulnérable. Il s'agit d'une activité à haut risque dont le but est la connaissance scientifique en soi, et dont il est impossible de prévoir les résultats ou les applications. Même les grands savants ont parfois été incapables de prévoir les applications pertinentes de leurs travaux. Ernest Rutherford, qui a découvert le noyau de l'atome dans le cadre de ses recherches menées en partie à l'Université McGill, déclarait en 1933 « Quiconque espère que la transformation de l'atome constituera une source d'énergie prend ses désirs pour des réalités ». Or, l'énergie nucléaire est aujourd'hui une industrie dont le Canada est un chef de file, et elle mobilise d'autant plus d'attention que le Protocole de Kyoto vise à limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Les économistes ont étudié les retombées économiques des innovations découlant de la recherche et ils estiment que la croissance économique des pays industrialisés est fondée sur la connaissance, dans une proportion de la moitié aux deux tiers. Des études récentes estiment que le taux annuel de rendement des investissements dans la recherche fondamentale varie de 28 à 50 %, selon les hypothèses retenues. On peut prouver de manière directe que les investissements passés en physique subatomique ont eu des retombées représentant plusieurs fois le montant investi.

Voici quelques exemples actuels de la R et D canadienne dans la technologie de la physique subatomique ayant des applications dans d'autres domaines.

Photomultiplicateur au silicium : Les photomultiplicateurs classiques sont issus des expériences de physique subatomique et ils constituent aujourd'hui les dispositifs électroniques sous vide les plus utilisés, représentant une industrie qui génère des milliards de dollars de recettes annuelles à l'échelle planétaire. Leur développement est maintenant stimulé par les exigences de l'imagerie médicale, mais ils sont employés dans une large gamme de disciplines, dont la recherche spatiale, l'archéologie, la géologie, la physique, la biologie, l'astronomie, la métallurgie, la chimie et l'agriculture. Le photomultiplicateur au silicium est un nouveau type d'appareil qui emploie un nouveau photosenseur reposant sur la technologie des semiconducteurs, et qui est destiné aux expériences en physique subatomique. Le Canada joue un rôle de premier plan dans son développement par sa participation aux projets GlueX et T2K. Le photomultiplicateur au silicium possède plusieurs caractéristiques intéressantes, notamment l'insensibilité aux champs magnétiques intenses, un faible encombrement, la résistance aux radiations, la rentabilité, un bon rendement et une résolution énergétique et temporelle supérieure. Ces attributs en font un appareil convenant non seulement aux applications en physique subatomique mais aussi hautement souhaitable pour des applications en physique médicale, dont la tomographie par émissions de positrons, qui bénéficierait de la résolution spatiale considérablement accrue offerte par l'appareil et pourrait ainsi permettre des diagnostics et la prévention à un stade précoce.

Microdétecteurs de gaz : L'une des innovations les plus prometteuses de l'imagerie radiologique moderne concerne le développement de détecteurs de particules chargées où les ions sont retracés au moyen de microdétecteurs de gaz. Le développement de ces microdétecteurs est lié aux impératifs de la recherche en physique subatomique fondamentale et l'appareil tire parti des récents progrès dans les logiciels de simulation, la conception de systèmes électroniques avancés de lecture et la fabrication de surface. Les microdétecteurs de gaz seront au cœur de la technologie de suivi dans les applications futures en physique des particules comme à T2K, à SNOLab, à l'ILC et dans d'autres détecteurs de haute précision. Le développement de nouveaux détecteurs de particules a de nombreuses applications au-delà de la recherche fondamentale en physique, en particulier dans les domaines de l'imagerie médicale et industrielle.



Détecteurs à scintillateur plastique utilisés à Fermilab.

Calorimètre à gaz nobles : Les gaz nobles (néon, argon, krypton, xénon) sont largement utilisés en tant que milieux de détection dans les calorimètres de physique des particules. Le calorimètre à argon liquide utilisé dans l'expérience ATLAS est un exemple récent. La mesure d'électrons ionisants et de la lumière de scintillation offre un moyen de distinguer les reculs nucléaires des reculs d'électrons et constitue un élément clé pour l'identification des candidats à la matière noire. La détection des électrons ionisants améliore également la résolution énergétique mais, qui plus est, elle permet de mesurer avec une haute précision le point d'interaction gamma. Cette caractéristique est ici encore particulièrement pertinente pour la tomographie à émission de positrons qui bénéficierait considérablement d'une meilleure résolution en énergie et en position.

Calcul haute performance : La physique subatomique est à l'origine du développement du calcul haute performance comme le calcul sur grille et l'extraction de données. Les expériences en physique des hautes énergies requièrent la collecte d'énormes quantités de données et des installations de calcul à grande échelle pour leur analyse. Les innovations attendues du calcul sur grille auront les mêmes conséquences pour le calcul à grande échelle que le Web a pu avoir pour l'échange d'information. Les exemples canadiens de calcul sur grille sont WestGrid et GridXl, tous deux des modèles importants en physique subatomique.

La modélisation et la simulation dans la recherche en physique subatomique produiront également des avantages à plus long terme pour la société. Par exemple, les nouvelles initiatives de calcul auront des retombées dans divers domaines, comme la mise au point de nouveaux produits pharmaceutiques et d'autres produits chimiques spécialisés, l'amélioration des techniques d'extraction de données et la meilleure modélisation des systèmes géophysiques et environnementaux.

Voici quelques exemples de liens industriels directs et d'entreprises issues de la recherche en physique subatomique au Canada :

Bubble Technology Industries : détection des radiations et des menaces. Implanté à Chalk River, BubbleTech est un fabricant de dosimètres de radiation et d'instruments de mesure de la radioactivité. Sa clientèle évolue dans le domaine de la radioprotection et dans les domaines apparentés de la surveillance des radiations.

MDS-Nordion : production de radioisotopes. MDS-Nordion est une division de la société MDS Inc., entreprise multinationale en sciences de la santé et sciences du vivant spécialisée dans la production de radioisotopes et de technologies connexes. Dans le cadre d'un partenariat TRIUMF Nordion vieux de 28 ans (qui a remporté en 2004 le Prix Synergie pour l'innovation du CRSNG), TRIUMF exploite trois cyclotrons à haute intensité pour Nordion dans ses locaux et Nordion y produit des traceurs d'imagerie médicale pour quelque 45 000 patients partout dans le monde, chaque semaine. L'établissement de MDS Nordion à Vancouver compte environ 50 employés qui se consacrent au traitement des isotopes et appuient les 35 membres du personnel de TRIUMF qui exploitent les cyclotrons. Le partenariat contribue à faire de TRIUMF un établissement scientifique international de proue et a permis à MDS Nordion de devenir un fournisseur mondial d'imagerie diagnostique et d'isotopes thérapeutiques.

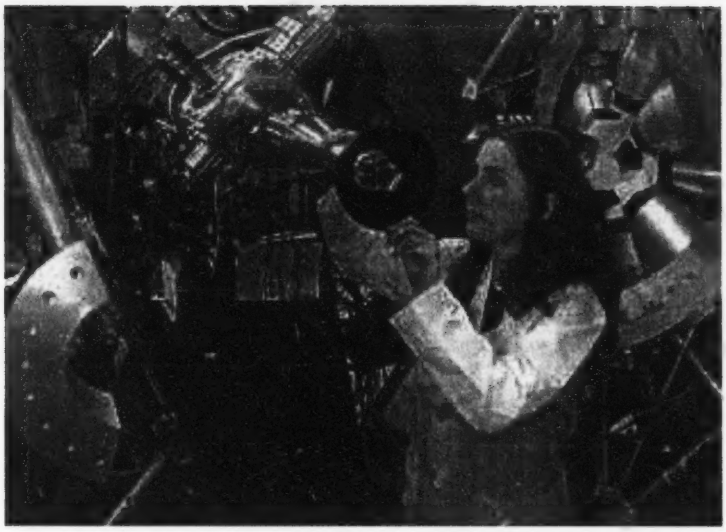
D-PACE : génie des accélérateurs de particules. D-PACE est une entreprise issue de TRIUMF qui fournit des services en génie de pointe à l'industrie des accélérateurs de particules, et se spécialise dans la conception de systèmes de faisceaux (sources d'ions, simulation de transport de faisceaux, etc.), de diagnostic et d'aimants. La société propose sous licence la technologie de TRIUMF au marché international et a été fondée par M. Dehnel, qui a obtenu son doctorat à l'issue de recherches à TRIUMF en 1995.

JML Biopharm : traceurs médicaux. JML Biopharm est une société de Vancouver créée par un attaché de recherche en 2001. L'entreprise compte à l'heure actuelle cinq employés et se spécialise dans l'étiquetage personnalisé des molécules pour l'industrie pharmaceutique et pour l'imagerie médicale.

5.2 Formation de personnel hautement qualifié

La physique subatomique est un excellent champ d'action pour le personnel hautement qualifié. Les étudiants sont attirés vers la physique subatomique par les possibilités de recherche passionnantes qu'elle offre. Dans leurs travaux pour résoudre les problèmes fondamentaux de la physique subatomique, ils sont mis au fait des dernières innovations informatiques et technologiques. En outre, les étudiants des cycles supérieurs en physique subatomique ont souvent l'occasion de participer à des collaborations internationales, ce qui se révèle un excellent atout puisqu'ils évoluent dans une économie mondialisée.

Nombre d'étudiants trouvent des postes permanents en physique et ils contribuent aux avancées de la recherche à long terme en physique subatomique. Toutefois, la majorité de notre personnel hautement qualifié se dirige vers des postes intéressants dans d'autres secteurs. On prend de plus en plus conscience que le transfert des capacités, des modes de pensée et de la connaissance à tous les secteurs de l'économie par la formation d'étudiants diplômés peut être au moins aussi important que le transfert direct d'information par des voies plus officielles, et ce indépendamment du domaine de spécialisation de l'étudiant. Il n'est pas facile de chiffrer l'ampleur de cet avantage, mais il est indubitable que les étudiants qui trouvent un emploi dans l'économie élargie ont une incidence économique importante sur le Canada par leur collaboration fructueuse avec l'industrie et leur contribution positive à d'autres domaines de la science.



Une étudiante aux cycles supérieurs en physique subatomique travaille sur le spectromètre à rayons gamma 8pi, à l'installation ISAC de TRIUMF.

Enfin, la valeur des études en physique pour la société se reflète par les salaires élevés et le très faible taux de chômage des titulaires de diplôme d'études supérieures en physique. Une étude portant sur 945 diplômés canadiens en physique faisait état d'un taux de chômage inférieur à 1 % chez les Canadiens ayant une formation dans cette discipline. L'étude a également révélé que parmi ceux qui occupaient un emploi, les titulaires d'une maîtrise ou d'un doctorat en physique subatomique avaient des salaires supérieurs de 25 % en moyenne à ceux des titulaires d'un diplôme d'études supérieures dans d'autres branches de la physique – ce qui est une mesure directe de la valeur accordée par le secteur privé à leurs compétences et à leur formation. Les deux citations suivantes, qui émanent d'entreprises canadiennes dans le secteur de la technologie, soulignent bien ce fait :

> Aujourd'hui, la plus grande partie de la formation risque de devenir obsolète au cours d'une carrière en technologie, sauf en ce qui a trait aux sciences de base : la physique, les mathématiques et la chimie. Les sciences de base, et la physique en particulier, donnent aux gens la capacité d'avoir accès à n'importe quel domaine émergent. C'est pourquoi les physiciens remportent tant de succès à des postes hautement techniques. À Creo, par exemple, nous avons porté notre chiffre d'affaires annuel de 10 millions de dollars par an à près de 1 milliard de dollars grâce à l'innovation fondée sur la physique. Au Canada, nous employons environ 60 physiciens, et environ la moitié d'entre eux ont un diplôme d'études supérieures.
> **– Dan Gelbart, fondateur et pdg de Creo (maintenant une division de Kodak)**

> Bubble Technology Industries est une société qui a bénéficié du programme de formation en physique subatomique du Canada. L'Amérique du Nord a un besoin criant de ce type de physiciens à l'heure actuelle et souffre d'une grave pénurie à cet égard en raison de la fermeture de plusieurs départements de physique nucléaire au cours des 20 dernières années. BTI est toujours en quête de bons candidats ayant une formation en physique subatomique et nous continuerons à rechercher des physiciens ayant ce profil dans un avenir prévisible.
> **– Harry Ing, Bubble Technology Industries, Chalk River (Ontario)**

Une étudiante aux cycles supérieurs en physique subatomique travaille sur le spectromètre à rayons gamma 8pi, à l'installation ISAC de TRIUMF.

Enfin, la valeur des études en physique pour la société se reflète par les salaires élevés et le très faible taux de chômage des titulaires de diplôme d'études supérieures en physique. Une étude portant sur 945 diplômés canadiens en physique faisait état d'un taux de chômage inférieur à 1 % chez les Canadiens ayant une formation dans cette discipline. L'étude a également révélé que parmi ceux qui occupaient un emploi, les titulaires d'une maîtrise ou d'un doctorat en physique subatomique avaient des salaires supérieurs de 25 % en moyenne à ceux des titulaires d'un diplôme d'études supérieures dans d'autres branches de la physique – ce qui est une mesure directe de la valeur accordée par le secteur privé à leurs compétences et à leur formation. Les deux citations suivantes, qui émanent d'entreprises canadiennes dans le secteur de la technologie, soulignent bien ce fait :

> **Aujourd'hui, la plus grande partie de la formation risque de devenir obsolète au cours d'une carrière en technologie, sauf en ce qui a trait aux sciences de base : la physique, les mathématiques et la chimie. Les sciences de base, et la physique en particulier, donnent aux gens la capacité d'avoir accès à n'importe quel domaine émergent. C'est pourquoi les physiciens remportent tant de succès à des postes hautement techniques. À Creo, par exemple, nous avons porté notre chiffre d'affaires annuel de 10 millions de dollars par an à près de 1 milliard de dollars grâce à l'innovation fondée sur la physique. Au Canada, nous employons environ 60 physiciens, et environ la moitié d'entre eux ont un diplôme d'études supérieures.**
> **– Dan Gelbart, fondateur et pdg de Creo (maintenant une division de Kodak)**

> **Bubble Technology Industries est une société qui a bénéficié du programme de formation en physique subatomique du Canada. L'Amérique du Nord a un besoin criant de ce type de physiciens à l'heure actuelle et souffre d'une grave pénurie à cet égard en raison de la fermeture de plusieurs départements de physique nucléaire au cours des 20 dernières années. BTI est toujours en quête de bons candidats ayant une formation en physique subatomique et nous continuerons à rechercher des physiciens ayant ce profil dans un avenir prévisible.**
> **– Harry Ing, Bubble Technology Industries, Chalk River (Ontario)**

Au cours de la préparation du présent rapport, nous avons réalisé un sondage auprès des diplômés titulaires d'une maîtrise ou d'un doctorat ayant travaillé pour divers projets de physique des hautes énergies : ATLAS, BaBar, CDF, OPAL et ZEUS. Parmi ceux qui occupent un poste permanent (160 titulaires d'un diplôme d'études supérieures), 21 % avaient trouvé un poste à l'université, 33 % travaillaient dans des organismes de recherche et les autres occupaient des postes industriels ou non traditionnels. Les postes non traditionnels ressortissent à des domaines aussi divers que les organismes publics (comme le Service canadien du renseignement de sécurité et le Conseil national de recherches du Canada), les finances, l'enseignement public et le journalisme scientifique. Dans les secteurs technologiques et industriels, ils occupaient des postes en entreprise dans des domaines comme le logiciel informatique, l'électronique, les systèmes d'information géographique, l'énergie nucléaire et la physique médicale.

Par conséquent, les diplômés en physique subatomique sont recherchés et leur formation leur permet de réussir auprès d'une large gamme d'organisations publiques et privées. **Un investissement dans le personnel hautement qualifié en physique subatomique est un investissement dans une économie technologiquement novatrice.**

Voici comment quelques diplômés récents décrivent l'utilité de la formation en physique subatomique. Les citations sont reproduites avec leur autorisation :

> Ma formation en physique subatomique expérimentale m'a donné les compétences techniques et en communication nécessaires pour réussir en génie de haute technologie. J'ai découvert que la démarche pour résoudre les problèmes à partir des « principes premiers » apprise en physique est différente mais complémentaire de la démarche de la plupart des ingénieurs. L'expérience que j'ai acquise dans l'élaboration de nouveaux détecteurs et d'appareils expérimentaux pour les expériences en physique subatomique m'a appris à toujours essayer de repousser les limites de la technologie actuelle. Cette expérience est tout à fait utile pour la R et D industrielle.
> **– Andrew Feltham, Ph.D. (University of British Columbia, 1992), ingénieur logiciel principal, Broadcom Canada Ltd.**

> Je travaille comme physicienne dans une entreprise du secteur des pâtes et papiers. Je dirige un laboratoire d'échantillonnage et mon travail consiste à mener des expériences pour déterminer si nos capteurs peuvent être utilisés pour mesurer les propriétés des produits de nos clients avec le niveau d'exactitude souhaité. Ce travail requiert une compréhension fine du matériel de laboratoire, des principes physiques de fonctionnement et des limites de chaque capteur. Nous utilisons des jauges nucléaires et à rayons-x avec une variété de radionucléides et d'énergies, et nous avons également une gamme de spectromètres dans l'infrarouge et le visible, qui tous peuvent être personnalisés jusqu'à un certain point. La conception des expériences et la configuration du matériel exigent une idée claire des questions auxquelles il faut répondre et des compromis qui peuvent être faits, et l'analyse des résultats des expériences requiert une solide connaissance de la statistique. Ensuite, il faut documenter les résultats de façon compréhensible pour le personnel de vente, le personnel de fabrication et les ingénieurs chargés du service après vente et de la maintenance, ce qui nécessite de bonnes aptitudes en communication et la capacité de simplifier les explications sans perdre de vue l'aspect scientifique. Toutes ces compétences, je les ai acquises au cours de mes études de doctorat et postdoctorales en physique expérimentale des hautes énergies.
> **– Reena Meijer-Drees, Ph.D. (University of British Columbia, 1991), Honeywell**

Ma formation en physique des particules m'a préparée à plusieurs égards à ma carrière dans le domaine des finances. D'abord, elle m'a donné de bonnes bases dans les méthodes de Monte Carlo qui m'ont énormément servi pour la modélisation d'instruments financiers complexes. Ensuite, l'obtention d'un Ph.D. en physique est en soi une discipline d'apprentissage fort utile. Dans une thèse de doctorat on se trouve confronté à un problème complexe d'envergure dont on ne peut entrevoir immédiatement la solution. La patience, la persévérance et le détachement requis pour effectuer la recherche nécessaire pour la thèse sont des qualités qui se transportent très aisément dans le monde des affaires. Enfin, le travail au sein de grands groupes de collaboration internationale en physique m'a enseigné des compétences fort précieuses en communication et en interaction de groupe qui sont indispensables pour le succès au sein d'une grande institution financière.
– LeeAnn Janissen, Ph.D. (Carleton University, 1993), vice-présidente directrice, TD Securities

Je dois beaucoup à ma formation en physique subatomique. Tout ce que je sais s'apparente au développement de systèmes. La physique subatomique nous fait entrer en contact avec une foule de systèmes : depuis les systèmes de physique, en passant par les systèmes techniques d'un détecteur et au-delà, jusqu'aux « systèmes » de coordination de toutes les personnes concernées. En physique subatomique, on a amplement l'occasion de voir comment des scientifiques aguerris comprennent un système à différents niveaux d'abstraction, depuis la boîte noire jusqu'à la cause profonde, au besoin. Le superordinateur Blue Gene/L est une excellente démonstration de la valeur de la formation en physique subatomique. La machine est elle même issue des ordinateurs utilisés pour la CDQ sur réseau. Les deux principaux scientifiques à l'origine du Blue Gene/L ont une formation en physique subatomique.
– Burkard Steinmacher-Burow, Ph.D. (University of Toronto, 1994), Blue Gene/L System Development, IBM

Lorsque je dis aux gens que je suis journaliste et que j'ai étudié en physique, on me fait toujours remarquer que « c'est un grand changement ». Je ne suis pas particulièrement d'accord car je trouve que les deux branches sont assez semblables, sous plusieurs aspects. Dans les études de physique, on apprend à se servir des mathématiques comme outil pour comprendre ou expliquer le monde autour de nous. Lorsqu'on étudie en lettres ou en journalisme, on apprend comment utiliser la langue comme outil pour comprendre ou expliquer le monde, si bien que globalement j'ai le sentiment d'être passé des maths à la communication mais de faire encore essentiellement de la science en expliquant ou en approfondissant les choses. Même si je ne peux pas utiliser directement les compétences que j'ai acquises, je trouve que la grande différence entre moi et les autres journalistes ayant une autre formation, c'est que je n'ai pas peur de ces sujets. La plupart des journalistes ont une formation en arts libéraux et ils ne comprennent pas la différence entre un quirk et un quark. J'ai étudié les quarks (plus précisément les quarks bottom). La physique des particules est très rigoureuse et cette étude m'a donné une assez bonne idée de la façon d'évaluer la validité scientifique et l'importance de la recherche – deux choses qui sont incroyablement pratiques et importantes pour une journaliste scientifique.
– Zerah Lurie, M. Sc (University of British Columbia, 2002), journaliste scientifique, CBC Vancouver

Au cours de la préparation du présent rapport, nous avons réalisé un sondage auprès des diplômés titulaires d'une maîtrise ou d'un doctorat ayant travaillé pour divers projets de physique des hautes énergies : ATLAS, BaBar, CDF, OPAL et ZEUS. Parmi ceux qui occupent un poste permanent (160 titulaires d'un diplôme d'études supérieures), 21 % avaient trouvé un poste à l'université, 33 % travaillaient dans des organismes de recherche et les autres occupaient des postes industriels ou non traditionnels. Les postes non traditionnels ressortissent à des domaines aussi divers que les organismes publics (comme le Service canadien du renseignement de sécurité et le Conseil national de recherches du Canada), les finances, l'enseignement public et le journalisme scientifique. Dans les secteurs technologiques et industriels, ils occupaient des postes en entreprise dans des domaines comme le logiciel informatique, l'électronique, les systèmes d'information géographique, l'énergie nucléaire et la physique médicale.

Par conséquent, les diplômés en physique subatomique sont recherchés et leur formation leur permet de réussir auprès d'une large gamme d'organisations publiques et privées. **Un investissement dans le personnel hautement qualifié en physique subatomique est un investissement dans une économie technologiquement novatrice.**

Voici comment quelques diplômés récents décrivent l'utilité de la formation en physique subatomique. Les citations sont reproduites avec leur autorisation :

> Ma formation en physique subatomique expérimentale m'a donné les compétences techniques et en communication nécessaires pour réussir en génie de haute technologie. J'ai découvert que la démarche pour résoudre les problèmes à partir des « principes premiers » apprise en physique est différente mais complémentaire de la démarche de la plupart des ingénieurs. L'expérience que j'ai acquise dans l'élaboration de nouveaux détecteurs et d'appareils expérimentaux pour les expériences en physique subatomique m'a appris à toujours essayer de repousser les limites de la technologie actuelle. Cette expérience est tout à fait utile pour la R et D industrielle.
> **– Andrew Feltham, Ph.D. (University of British Columbia, 1992), ingénieur logiciel principal, Broadcom Canada Ltd.**

> Je travaille comme physicienne dans une entreprise du secteur des pâtes et papiers. Je dirige un laboratoire d'échantillonnage et mon travail consiste à mener des expériences pour déterminer si nos capteurs peuvent être utilisés pour mesurer les propriétés des produits de nos clients avec le niveau d'exactitude souhaité. Ce travail requiert une compréhension fine du matériel de laboratoire, des principes physiques de fonctionnement et des limites de chaque capteur. Nous utilisons des jauges nucléaires et à rayons-x avec une variété de radionucléides et d'énergies, et nous avons également une gamme de spectromètres dans l'infrarouge et le visible, qui tous peuvent être personnalisés jusqu'à un certain point. La conception des expériences et la configuration du matériel exigent une idée claire des questions auxquelles il faut répondre et des compromis qui peuvent être faits, et l'analyse des résultats des expériences requiert une solide connaissance de la statistique. Ensuite, il faut documenter les résultats de façon compréhensible pour le personnel de vente, le personnel de fabrication et les ingénieurs chargés du service après vente et de la maintenance, ce qui nécessite de bonnes aptitudes en communication et la capacité de simplifier les explications sans perdre de vue l'aspect scientifique. Toutes ces compétences, je les ai acquises au cours de mes études de doctorat et postdoctorales en physique expérimentale des hautes énergies.
> **– Reena Meijer-Drees, Ph.D. (University of British Columbia, 1991), Honeywell**

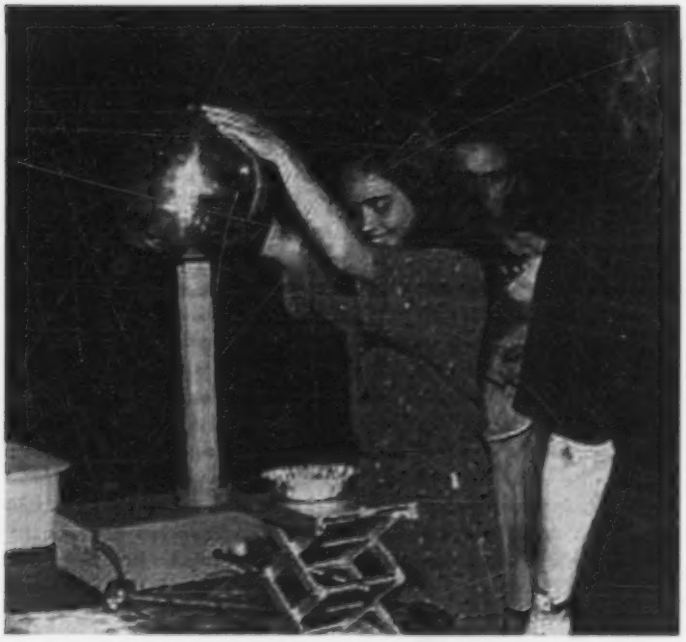
Ma formation en physique des particules m'a préparée à plusieurs égards à ma carrière dans le domaine des finances. D'abord, elle m'a donné de bonnes bases dans les méthodes de Monte Carlo qui m'ont énormément servi pour la modélisation d'instruments financiers complexes. Ensuite, l'obtention d'un Ph.D. en physique est en soi une discipline d'apprentissage fort utile. Dans une thèse de doctorat on se trouve confronté à un problème complexe d'envergure dont on ne peut entrevoir immédiatement la solution. La patience, la persévérance et le détachement requis pour effectuer la recherche nécessaire pour la thèse sont des qualités qui se transportent très aisément dans le monde des affaires. Enfin, le travail au sein de grands groupes de collaboration internationale en physique m'a enseigné des compétences fort précieuses en communication et en interaction de groupe qui sont indispensables pour le succès au sein d'une grande institution financière.
– LeeAnn Janissen, Ph.D. (Carleton University, 1993), vice-présidente directrice, TD Securities

Je dois beaucoup à ma formation en physique subatomique. Tout ce que je sais s'apparente au développement de systèmes. La physique subatomique nous fait entrer en contact avec une foule de systèmes : depuis les systèmes de physique, en passant par les systèmes techniques d'un détecteur et au-delà, jusqu'aux « systèmes » de coordination de toutes les personnes concernées. En physique subatomique, on a amplement l'occasion de voir comment des scientifiques aguerris comprennent un système à différents niveaux d'abstraction, depuis la boîte noire jusqu'à la cause profonde, au besoin. Le superordinateur Blue Gene/L est une excellente démonstration de la valeur de la formation en physique subatomique. La machine est elle même issue des ordinateurs utilisés pour la CDQ sur réseau. Les deux principaux scientifiques à l'origine du Blue Gene/L ont une formation en physique subatomique.
– Burkard Steinmacher-Burow, Ph.D. (University of Toronto, 1994), Blue Gene/L System Development, IBM

Lorsque je dis aux gens que je suis journaliste et que j'ai étudié en physique, on me fait toujours remarquer que « c'est un grand changement ». Je ne suis pas particulièrement d'accord car je trouve que les deux branches sont assez semblables, sous plusieurs aspects. Dans les études de physique, on apprend à se servir des mathématiques comme outil pour comprendre ou expliquer le monde autour de nous. Lorsqu'on étudie en lettres ou en journalisme, on apprend comment utiliser la langue comme outil pour comprendre ou expliquer le monde, si bien que globalement j'ai le sentiment d'être passé des maths à la communication mais de faire encore essentiellement de la science en expliquant ou en approfondissant les choses. Même si je ne peux pas utiliser directement les compétences que j'ai acquises, je trouve que la grande différence entre moi et les autres journalistes ayant une autre formation, c'est que je n'ai pas peur de ces sujets. La plupart des journalistes ont une formation en arts libéraux et ils ne comprennent pas la différence entre un quirk et un quark. J'ai étudié les quarks (plus précisément les quarks bottom). La physique des particules est très rigoureuse et cette étude m'a donné une assez bonne idée de la façon d'évaluer la validité scientifique et l'importance de la recherche – deux choses qui sont incroyablement pratiques et importantes pour une journaliste scientifique.
– Zerah Lurie, M. Sc (University of British Columbia, 2002), journaliste scientifique, CBC Vancouver

La génératrice Van der Graaf, dont le principe de fonctionnement est identique à celui des petits accélérateurs de particules, fascine toujours les jeunes.

Bien qu'à première vue le rapport entre la pratique du droit et les compétences scientifiques acquises au cours des études de physique ne soit pas évident, la capacité d'analyse, la formation rigoureuse en résolution de problèmes, le souci du détail et la capacité de discerner des constantes et de faire la synthèse des principes premiers à partir de données en apparence disparates – en fait tout ce que j'ai appris dans les cours de doctorat en physique subatomique sont d'une valeur inestimable dans ma pratique d'avocat. Outre que j'ai acquis une formation générale rigoureuse et de la méthode, mes bases en physique me permettent également de mieux comprendre les rapports scientifiques ou techniques des experts, les dossiers sur la propriété intellectuelle et la technologie de l'information, et elles m'ont donné les bases nécessaires en mathématiques pour comprendre l'expertise financière ou les modèles actuariels qui sont utilisés dans les dossiers commerciaux ou d'assurance complexes et, en bout de ligne, ma formation me donne une longueur d'avance dans ces dossiers. Je me rappelle un cas en particulier, où j'ai été capable de raffiner un modèle mathématique détaillé présenté par notre ingénieur, de façon à refléter la perte exacte de profits en raison des fluctuations instantanées d'un produit de base et, par conséquent, de réduire de plusieurs millions de dollars la réclamation – quelque chose que seules mes études de physique pouvaient me permettre de faire. Nul doute dans mon esprit que ma formation en physique fait de moi un meilleur avocat aujourd'hui.
– Patrick Girard, Ph.D. (McGill, 2000), LL.B., Stikeman-Elliott LLP



La génératrice Van der Graaf, dont le principe de fonctionnement est identique à celui des petits accélérateurs de particules, fascine toujours les jeunes.

Bien qu'à première vue le rapport entre la pratique du droit et les compétences scientifiques acquises au cours des études de physique ne soit pas évident, la capacité d'analyse, la formation rigoureuse en résolution de problèmes, le souci du détail et la capacité de discerner des constantes et de faire la synthèse des principes premiers à partir de données en apparence disparates – en fait tout ce que j'ai appris dans les cours de doctorat en physique subatomique sont d'une valeur inestimable dans ma pratique d'avocat. Outre que j'ai acquis une formation générale rigoureuse et de la méthode, mes bases en physique me permettent également de mieux comprendre les rapports scientifiques ou techniques des experts, les dossiers sur la propriété intellectuelle et la technologie de l'information, et elles m'ont donné les bases nécessaires en mathématiques pour comprendre l'expertise financière ou les modèles actuariels qui sont utilisés dans les dossiers commerciaux ou d'assurance complexes et, en bout de ligne, ma formation me donne une longueur d'avance dans ces dossiers. Je me rappelle un cas en particulier, où j'ai été capable de raffiner un modèle mathématique détaillé présenté par notre ingénieur, de façon à refléter la perte exacte de profits en raison des fluctuations instantanées d'un produit de base et, par conséquent, de réduire de plusieurs millions de dollars la réclamation – quelque chose que seules mes études de physique pouvaient me permettre de faire. Nul doute dans mon esprit que ma formation en physique fait de moi un meilleur avocat aujourd'hui.
– Patrick Girard, Ph.D. (McGill, 2000), LL.B., Stikeman-Elliott LLP

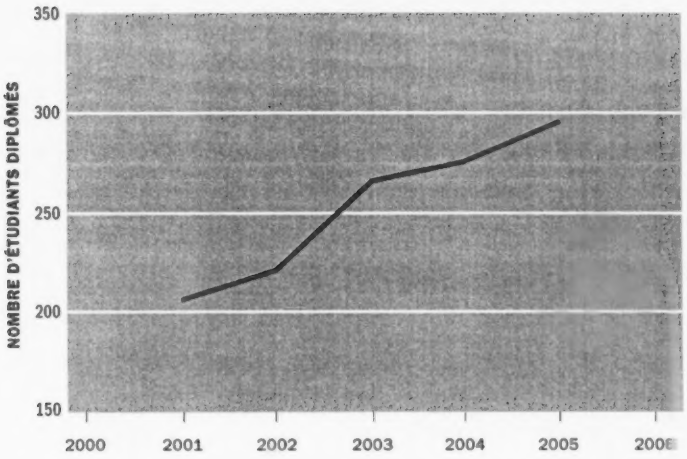


Figure 4 : Nombre d'étudiants inscrits à des programmes de physique subatomique expérimentale ou théorique de deuxième et troisième cycles au Canada, pour les années 2001 à 2005

Au cours des cinq dernières années, le nombre d'étudiants des cycles supérieurs en physique subatomique dans les universités canadiennes a progressé régulièrement. Comme le montre la figure 4, le nombre d'étudiants de deuxième et troisième cycles participant à l'heure actuelle à des projets de recherche en physique subatomique est supérieur d'environ 55 % à ce qu'il était au moment du plan à long terme précédent, en 2001. Cette augmentation est généralisée, puisqu'on assiste à une forte croissance dans tous les programmes d'études expérimentales et théoriques de physique subatomique au Canada. Une fois diplômés, nombre de ces étudiants feront une contribution fort précieuse et importante à la société et à l'avenir économique du Canada. Étant donné que la recherche fondamentale en physique subatomique a souvent des retombées inattendues, tout ce qu'on peut affirmer avec certitude c'est que son incidence économique sera positive et aidera le Canada à demeurer un chef de file mondial en technologie.

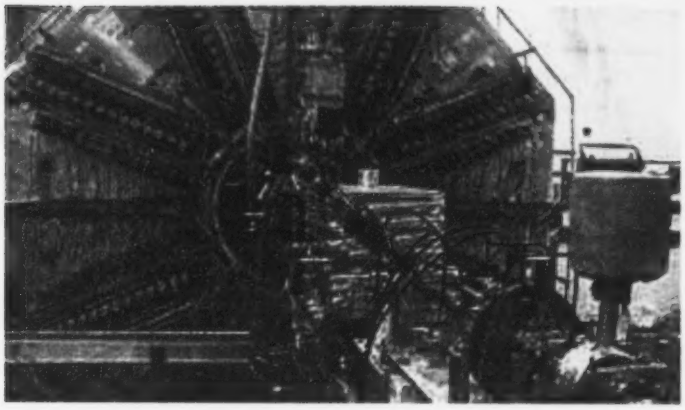
6
Appui à la physique subatomique au Canada

6.1 Aperçu

La communauté canadienne de physique subatomique optimise son programme de recherche par des exercices de planification comme l'actuel Plan à long terme. Cet exercice piloté par la communauté recommande un nombre restreint de projets sur lesquels on concentrera les efforts, tout en recherchant un équilibre entre le mérite scientifique et les retombées potentielles, l'expertise, l'intérêt et les ressources disponibles. Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) est généralement le principal organisme de financement de ces projets, mais certains autres sont appuyés par divers organismes ou mécanismes, et leur structure de financement peut être complexe. Comme la coordination des différents organismes et mécanismes de financement est essentielle au succès de ces projets, on a demandé au Comité de planification à long terme de faire des commentaires sur le rôle des organismes et instituts qui contribuent de la façon la plus significative à la physique subatomique au Canada.

Le programme canadien de physique subatomique se déploie sur une large gamme d'échelles différentes, en ce qui concerne la taille des projets et le temps qui leur est imparti. Un programme expérimental peut concerner un petit groupe menant une expérience unique dans une installation existante de courte durée, par exemple un an, tandis qu'un autre peut reposer sur une vaste collaboration internationale, se poursuivre sur une période de dix ans ou plus, et nécessiter la construction et l'exploitation de très grands détecteurs ou d'installations d'envergure mettant à contribution des centaines, voire des milliers de personnes.

Par bonheur, les techniques expérimentales, la technologie des détecteurs de particules, l'électronique, ainsi que les centres de calcul et d'analyse se chevauchent



L'expérience G0, dans le hall C du Jefferson Laboratory, s'appuie sur une importante contribution canadienne grâce au soutien du CRSNG et de TRIUMF. On peut voir dans la figure quelques-uns des 300 socles de phototubes construits et testés à TRIUMF.

considérablement d'un projet de physique subatomique à l'autre, et il est possible de renforcer la productivité de la communauté avec une puissante infrastructure de base. Une telle infrastructure comprend les installations où les expériences peuvent être menées, le personnel technique hautement qualifié pour construire, utiliser et entretenir les instruments uniques et complexes, ainsi que l'infrastructure informatique et de réseautage capable de traiter les énormes ensembles de données qui caractérisent la physique subatomique.

Il est clair qu'il convient de consolider les mécanismes d'examen du financement au Canada afin de maintenir un programme cohérent couvrant les dépenses d'immobilisation, l'appui aux infrastructures et les fonds d'exploitation pour les expériences et les installations. Dans ce contexte, il serait fort pertinent de disposer d'un mécanisme comme le Groupe d'experts chargé de l'expansion des grands projets d'investissements scientifiques (GEGPIS) afin de superviser de manière cohérente les nombreuses sources de financement.

6.2 Appui financier à la physique subatomique

Les mécanismes de financement de la physique subatomique au Canada sont complexes. Le personnel de recherche – membres du corps professoral, chercheurs postdoctorants et étudiants – est généralement rattaché à l'université et les activités de recherche, notamment les déplacements, le matériel ainsi que les fournitures, sont financées par les Subventions à la découverte du CRSNG. Ces dernières années, un appui aux immobilisations a également été fourni par l'intermédiaire de la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) en partenariat avec des programmes provinciaux. Le Programme des chaires de recherche du Canada, qui a contribué au renouvellement du corps professoral, a insufflé un sang nouveau à la physique subatomique canadienne. Tant les nominations dans le cadre du Programme des chaires de recherche du Canada que les nominations de professeurs titulaires dans les universités ont revigoré la vision et les orientations de notre communauté scientifique. Enfin, le Conseil national de recherches supervise l'activité du laboratoire national TRIUMF financé par le gouvernement fédéral, lequel offre une infrastructure d'appui au programme de physique subatomique.

Pour replacer dans son contexte l'analyse qui suit, notons que le budget annuel de TRIUMF est actuellement de l'ordre de 45 millions de dollars, que la part du budget du CRSNG dédiée à la physique subatomique est d'environ 23 millions de dollars par an et qu'au cours des cinq dernières années, la FCI a injecté en moyenne environ 15 millions de dollars par an dans l'infrastructure de physique subatomique.

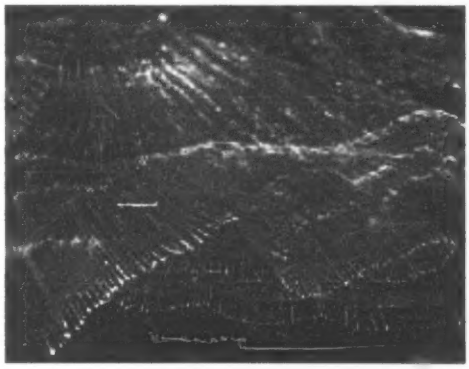
CRSNG – Gestion de l'enveloppe du CSS-19

Les expériences en physique subatomique ont des besoins financiers qui varient considérablement à mesure qu'elles progressent, depuis la construction jusqu'à la phase de l'exploitation. La phase de construction est caractérisée par d'importantes dépenses d'immobilisations pour les matériaux, l'infrastructure et le soutien techniques, tandis que la phase opérationnelle requiert le financement d'attachés de recherche et d'étudiants, des centres de calcul pour l'analyse des données, des déplacements ou des déménagements vers des laboratoires éloignés, le fonctionnement de détecteurs et le travail d'analyse. Le financement des théoriciens sert principalement à appuyer la formation d'étudiants des cycles supérieurs et d'attachés de recherche, une petite fraction allant à l'infrastructure, notamment pour le calcul. Les théoriciens et les expérimentateurs ont besoin d'un appui modeste au chapitre des déplacements afin de participer à des congrès et à des colloques de pointe qui sont essentiels à la communication des résultats et leur permettent de se tenir au fait des développements dans leur discipline. Le CRSNG est généralement la source de financement de toutes ces activités.

Les Subventions à la découverte du CRSNG sont examinées par les comités de sélection des subventions. La physique subatomique (CSS-19) a un statut particulier au sein du CRSNG du fait qu'elle bénéficie d'une enveloppe, si bien qu'un budget unique est la source de tous les fonds pour le matériel, l'infrastructure et les opérations. Tous les autres comités de sélection des subventions, y compris d'autres branches de la physique, se voient accorder des budgets distincts pour le fonctionnement et le matériel, et le financement de leurs infrastructures provient d'un programme distinct du CRSNG. Grâce à l'enveloppe du CSS 19, il est possible de faire des transferts de fonds de l'équipement à l'exploitation lorsqu'une expérience majeure devient opérationnelle, ce qui permet à l'infrastructure technique de passer d'un projet à un autre à différentes étapes de ce projet. Le système d'enveloppe est fort utile à la physique subatomique depuis plus de 15 ans, car il lui permet de devancer les exercices de planification afin de cerner les besoins majeurs en capitaux et de budgéter en conséquence.

Le CSS-19 administre également le Programme d'accès aux installations majeures du CRSNG pour l'infrastructure de la physique subatomique à l'université. Ces subventions jouent un rôle particulièrement important dans la répartition des coûts d'infrastructure entre les projets, comme nous l'avons mentionné à la section 6.3.

Au cours des cinq dernières années, le CSS-19 a bénéficié de petites majorations de l'enveloppe à l'issue de l'exercice de réaffectation des fonds et d'un certain montant pour tenir compte des nouveaux candidats. Toutefois, ces majorations demeurent sous le taux d'inflation et ne rendent pas compte adéquatement de la croissance du domaine et de la nécessité d'injecter des capitaux à l'appui de l'infrastructure.



Tissu de haute technologie composé de fibres scintillantes qui émettent de la lumière lorsque des particules chargées les traversent.

La Fondation canadienne pour l'innovation

Le gouvernement du Canada a mis sur pied la FCI en tant qu'organisme autonome, à but non lucratif, pour appuyer le développement d'une infrastructure de recherche de calibre mondial au Canada. L'infrastructure financée par la FCI a joué un rôle crucial dans l'expansion du programme de physique subatomique au Canada.

Par exemple, SNOLab, qui est actuellement en construction sur le site du SNO, a vu le jour grâce à l'octroi de 38 millions de dollars du Fonds de collaboration internationale de la FCI. La FCI a également fourni le financement au Laboratory for Advanced Detector Development (LADD), qui appuie la recherche fondamentale dans le développement de détecteurs pour la physique subatomique et les applications médicales. Le Centre de calcul de première catégorie (Tier-1) pour l'analyse des données ATLAS est financé par une contribution de la FCI, de même que d'autres centres de calcul haute performance au Canada, qui sont partagés par plusieurs disciplines, notamment la physique subatomique.

La FCI s'est également engagée à appuyer de nouveaux chercheurs et le Programme de chaires de recherche du Canada. Par l'intermédiaire de ces programmes, de nouveaux chercheurs en physique subatomique ont réussi à mettre sur pied des programmes de recherche nationaux et internationaux et ils ont utilisé l'infrastructure financée par la FCI comme levier financier pour obtenir un appui opérationnel important à même l'enveloppe du CSS 19.

L'appui de la FCI a été d'un avantage considérable pour le développement de l'infrastructure de la physique subatomique. Toutefois, cette infrastructure nécessite une augmentation comparable du fonds d'exploitation, ce qui taxe lourdement l'enveloppe du CSS 19. Les nombreux nouveaux chercheurs, qui mènent des programmes de recherche très dynamiques, se tournent vers le CRSNG pour obtenir un appui opérationnel. En outre, la source de l'appui opérationnel à des installations comme SNOLab n'a pas encore été indiquée. L'enveloppe actuelle ne peut tout simplement pas prendre en charge ces coûts de fonctionnement sans porter gravement atteinte à l'ensemble du programme de recherche en physique subatomique du Canada. Une approche plus globale s'impose manifestement pour le développement et le financement des nouvelles installations d'envergure. Ce serait là la finalité du GEGPIS, dont la création a été proposée, et nous exhortons le gouvernement à poursuivre dans cette voie afin que le Canada dispose d'un mécanisme bien établi pour construire et gérer les installations de recherche de pointe. La physique subatomique en particulier et la science canadienne en général ont besoin d'un mécanisme pour faire en sorte que tous les projets scientifiques d'envergure disposent dès le départ d'une source de financement clairement définie tant pour leurs immobilisations que pour leur fonctionnement.

6.3 Installations, instituts et autres infrastructures d'appui à la physique subatomique

L'existence d'un programme dynamique et viable en physique subatomique requiert un équilibre entre la R et D des détecteurs, la construction des expériences, leur fonctionnement et l'analyse des données. Cela exige des ingénieurs et des techniciens dûment formés et bien outillés pour concevoir et construire les prototypes des détecteurs, participer à la construction de nouveaux équipements majeurs pour les expériences de physique subatomique et veiller à l'administration et à la maintenance de ces dispositifs une fois qu'ils ont été installés et qu'ils sont entrés en service. Au Canada, cette infrastructure est fournie selon plusieurs axes. Elle prend appui sur des installations comme TRIUMF ou SNOLab, des programmes de subventions comme les Subventions d'accès aux installations majeures du CRSNG ou des organisations comme l'Institut de physique des particules. Dans cette section, nous décrivons l'appui aux infrastructures offert à la physique subatomique par diverses sources.

Groupe de techniciens d'Alstom Canada (Tracy, Québec), avec l'un des quadripôles conçus à TRIUMF et construits au Canada par Alstom pour le LHC du CERN.

Le laboratoire TRIUMF

Le laboratoire TRIUMF, qui regroupe plusieurs accélérateurs, est situé près du campus de l'UBC à Vancouver. Il est financé par le gouvernement fédéral par l'intermédiaire du Conseil national de recherches et géré par un consortium de 13 universités canadiennes. En activité depuis plus de 30 ans, il assure l'exploitation et la maintenance d'accélérateurs produisant une variété de faisceaux pour les expériences de physique subatomique et des applications interdisciplinaires, notamment des programmes en matière condensée, en chimie, en génie et en médecine. L'installation ISAC (complexe d'accélérateurs et de séparateurs d'isotopes à TRIUMF) attire des chercheurs de toutes les régions du Canada, mais compte aussi un nombre égal d'utilisateurs étrangers provenant d'Europe, du Japon et des États Unis.

La plupart des opérations de TRIUMF consistent à soutenir ses accélérateurs, notamment l'exploitation du complexe d'ISAC, les travaux de développement et de mise en production de nouveaux faisceaux d'isotopes radioactifs, l'expansion du complexe d'accélérateurs d'ISAC pour produire deux faisceaux d'ions radioactifs accélérés indépendants et le développement, au sein de l'installation ISAC, d'une seconde station de production utilisant un nouveau faisceau de protons de haute intensité. Les faisceaux de haute intensité accroîtront d'un facteur de 10 à 50 la production d'isotopes radioactifs et augmenteront considérablement la productivité scientifique, ce qui permettra à ISAC de passer à un nouveau régime d'énergie et assurera sa compétitivité soutenue pour les dix prochaines années et au-delà.

Outre ces activités, TRIUMF joue un rôle crucial en fournissant l'infrastructure de base à la communauté canadienne de physique subatomique à l'échelle nationale. Il effectue notamment la R et D pour les détecteurs et l'électronique et fournit un appui à la construction des composantes majeures des détecteurs utilisés à l'étranger par des groupes canadiens et au calcul haute performance au Canada pour les grands projets canadiens de physique subatomique. Certains membres du personnel hautement qualifié de TRIUMF, constitué de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens, reçoivent un appui dans différentes universités du pays, qui profitent de cette ressource fort précieuse et des expériences réalisées à l'appui de ce rôle d'infrastructure.

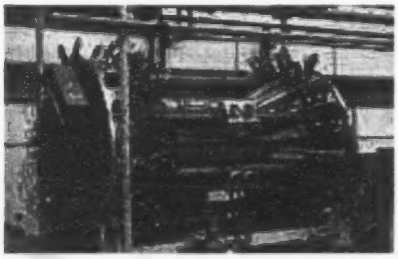
La chambre à dérive BaBar et le calorimètre hadronique bouchon ATLAS illustrent bien le type de composantes importantes de détecteurs construites à TRIUMF, qui a également joué un rôle majeur dans le soutien apporté à l'expérience G0 au JLab, et qui poursuivra cet effort à l'appui de l'expérience QWeak, qui aura également lieu au JLab. Dans les deux cas, l'expertise de TRIUMF et son soutien ont assuré une contribution canadienne importante à ces expériences.

TRIUMF hébergera également le centre informatique de niveau 1 (Tier-1) d'ATLAS, ce qui assurera le soutien requis pour la mise en service et l'étalonnage du détecteur ATLAS et pour l'analyse des données. Ce rôle, qui vient étayer le leadership canadien dans le secteur fort compétitif de l'analyse des données qui seront recueillies par l'expérience ATLAS, est considéré comme un élément crucial du programme du laboratoire dans son récent plan quinquennal. TRIUMF héberge également un segment important du projet LADD (Laboratoire de conception de détecteurs avancés), financé par la FCI afin de renouveler l'infrastructure électronique et mécanique nécessaire à la conception d'éléments de détecteurs complexes et de leurs circuits de lecture.

Riches d'une vaste expérience en conception d'accélérateurs et de cibles, les scientifiques de TRIUMF sont en demande dans le monde entier. Grâce à TRIUMF et à son personnel, le Canada est bien outillé pour faire d'importantes contributions en nature aux projets internationaux d'accélérateurs, ouvrant ainsi l'accès à ces installations aux scientifiques canadiens. Dans le cas du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN, le personnel de TRIUMF a conçu et supervisé la construction des aimants et il a fourni les composantes pour la mise à niveau du système d'injection. Ces contributions appréciables au LHC permettent aux scientifiques canadiens de participer à l'expérience ATLAS. TRIUMF assure par ailleurs la conception des systèmes de manutention des cibles qui seront utilisés pour la production de neutrinos au laboratoire J-PARC, au Japon, dans le cadre de la forte participation canadienne à l'expérience T2K. Les scientifiques de TRIUMF travaillent déjà à certaines phases conceptuelles passionnantes de l'ILC. Il est donc possible que le Canada puisse participer de manière importante à la construction de l'ILC et/ou aux mises à jour éventuelles du LHC, sous la gouverne de TRIUMF.

Les fonctions de TRIUMF à l'appui de l'infrastructure sont de la plus haute importance et leurs conséquences budgétaires sont particulièrement préoccupantes pour la communauté scientifique. Bien que TRIUMF ne puisse présenter directement de demandes à la FCI, les nouvelles missions qu'il entreprend pour soutenir la vision de la communauté de physique subatomique sont souvent à l'origine d'engagements opérationnels à long terme. Il faut prendre en compte ces répercussions sur le laboratoire et trouver des mécanismes permettant à TRIUMF de continuer à appuyer le programme ISAC. Pour mener à bien sa mission, TRIUMF devrait être en mesure d'avoir accès aux organismes de financement pertinents pour la physique subatomique, notamment la FCI.

Le milieu de la physique subatomique participe jusqu'à un certain point à l'élaboration des demandes de budget de TRIUMF en prenant part aux exercices de planification du laboratoire. Toutefois, le niveau de financement et les priorités du laboratoire sont déterminés, en bout de ligne, dans le cadre du processus budgétaire habituel du gouvernement fédéral, avec peu de consultation du milieu. Le Comité aimerait disposer d'un mécanisme plus transparent pour l'établissement du budget de TRIUMF et voir s'établir un lien plus étroit entre ce budget et les éléments du mandat et du plan quinquennal de l'organisme. Là encore, un mécanisme comme le GEGPIS mentionné ci-dessus, associé à des exercices de planification à long terme avec la participation de la communauté scientifique, pourrait aider à assurer la prise en compte des priorités de notre communauté.



Le Détecteur à grande acceptance pour la physique photonucléaire expérimentale (DAPHNE), au Microtron de Mainz, en Allemagne, où des physiciens canadiens étudient la photoproduction des résonances nucléaires.

Subvention d'accès aux installations majeures du CRSNG

L'appui technique au développement de détecteurs et de composantes, à la construction d'expériences, à la conception d'accélérateurs et au calcul haute performance est un élément essentiel pour le succès du programme de physique subatomique. Si les ingénieurs, les concepteurs et les techniciens en venaient à être appuyés uniquement projet par projet, leur expertise se perdrait entre les projets, et il deviendrait difficile d'assurer la continuité et l'excellence technique. Le CRSNG a conscience de cette réalité et il fournit aux universités un appui à l'infrastructure collective de la physique subatomique par l'intermédiaire de son Programme de subventions d'accès aux installations majeures (AIM). Ce programme, pour ce qui concerne la physique subatomique, diffère légèrement du Programme de subventions d'AIM applicable aux autres disciplines. Il n'est pas nécessaire qu'il soit pluri-institutionnel, pourvu que les subventions appuient plusieurs projets d'un même établissement. Les octrois du Programme AIM sont financés à même l'enveloppe du CSS 19.

Il n'est pas possible de financer d'importantes infrastructures dans chaque université et par conséquent il est essentiel que les universités qui reçoivent des subventions du Programme de subventions d'AIM considèrent l'appui aux chercheurs en physique subatomique des autres universités en matière d'infrastructure, comme faisant partie de leur mandat. L'utilisation des subventions du Programme de subventions d'AIM en physique subatomique par divers établissements n'a pas été uniforme à l'échelle du pays. Le Comité recommande fortement que la gestion des installations financées au moyen des subventions d'accès aux installations majeures soit officialisée et qu'on fasse largement savoir aux physiciens subatomiques que le personnel du Programme de subventions d'AIM est là pour eux. Mentionnons que le programme est actuellement en cours de révision et qu'il sera remplacé par le Programme d'appui aux ressources majeures (ARM). Nous exhortons le CSRNG à se pencher sur les besoins particuliers de la physique subatomique en élaborant les lignes directrices du nouveau programme. Un programme d'infrastructures de qualité au Canada constituera un véhicule efficace et rentable qui contribuera à maintenir la communauté canadienne de physique subatomique à l'avant garde.

Le SNOLab

L'installation internationale consacrée aux sciences souterraines (SNOLab) est le prolongement de l'actuel Observatoire des neutrinos de Sudbury et a été financée par le Fonds de collaboration internationale de la FCI. D'ici 2007, la construction d'un grand ouvrage souterrain supplémentaire et de plusieurs salles expérimentales plus petites aura été menée à bien, ce qui permettra à des expériences d'astrophysique des particules de se dérouler à de très grandes profondeurs. Enfoui à 2 000 mètres de profondeur, ce laboratoire est le plus profond du monde et le plus stérile. Ces qualités sont d'une importance considérable pour les expériences qui requièrent un rayonnement parasite ultrafaible et un blindage contre les rayonnements cosmiques.

Le nouveau complexe de surface équipé de laboratoires modernes, de bureaux et de salles blanches est déjà terminé et en service.

Le SNOLab fournira une infrastructure en offrant des locaux et en assurant des services de base aux expériences qui se déroulent dans un environnement souterrain exigeant. Le laboratoire dispose d'un personnel technique hautement qualifié et de scientifiques voués à la recherche qui ont l'expertise voulue pour accomplir des expériences souterraines avec des matériaux à faible radioactivité parasite. Ce personnel fournit un appui technique et logistique au programme expérimental du SNOLab.

L'Institut de physique des particules

L'Institut de physique des particules emploie huit scientifiques voués à la recherche qui sont rattachés à diverses universités du pays. Ces chercheurs occupent des postes qui font pendant à ceux des professeurs des universités canadiennes, si ce n'est que le financement du CRSNG et de l'Institut de physique des particules (IPP) les dégage de leur charge d'enseignement et leur permet de diriger à plein temps les projets canadiens en physique des particules. Ils sont par conséquent en mesure de consacrer beaucoup de temps au laboratoire à l'extérieur des campus, là où se déroulent les expériences. Les scientifiques de l'IPP voués à la recherche ont occupé des postes de porte parole, de coordonnateurs de la physique et de coordonnateurs d'expériences partout dans le monde. Même s'ils sont rattachés à un seul établissement canadien, ils agissent souvent en tant qu'agents de liaison pour l'ensemble de la communauté scientifique canadienne qui travaille dans des laboratoires étrangers.

Un institut théorique?

S'il y a consensus parmi les théoriciens canadiens de la physique subatomique quant à l'utilité de la création d'un institut qui organiserait des colloques, des séminaires et des programmes d'été, on ne s'accorde pas à l'heure actuelle sur le lieu et la forme de cet établissement, où les fonds voués à la recherche serviraient également à l'infrastructure administrative et informatique.

Les colloques et les séminaires thématiques constituent un mécanisme important pour les études et la formation des chercheurs en physique subatomique, car ils permettent à la communauté scientifique canadienne largement dispersée de bénéficier d'une gamme étendue d'expertise. L'organisation au Canada de congrès et de colloques internationaux contribue à rehausser le profil de la communauté scientifique canadienne et constitue une importante responsabilité qui incombe à notre pays en tant que membre de la communauté scientifique internationale. Toutefois, nous ne sommes pas parfaitement en mesure d'honorer cette responsabilité. Trouver des fonds pour assumer les coûts organisationnels de séminaires, de colloques et de réunions n'est pas chose facile et le CRSNG ne donne pas ce genre d'appui.

Théoriciens acharnés au travail à l'Institut Perimeter, à Waterloo (Ontario).

Un robot de bandothèque permet d'accéder aux données des expériences réalisées avec le collisionneur de Fermilab.

Il y a consensus à l'effet que les instituts existants comme l'Institut Perimeter et TRIUMF pourraient et devraient offrir le soutien administratif et l'infrastructure matérielle nécessaires pour organiser des séminaires, des colloques et des programmes d'été. En fait, ces établissements organisent bel et bien des programmes de ce genre, et le TRIUMF Summer Institute, par exemple, offre des stages d'été depuis maintenant 18 ans. Toutefois, il n'existe pas de procédure transparente pour la présentation et le choix de propositions de colloques. Le comité spécial de planification à long terme en physique théorique a suggéré la formation d'un conseil de direction formé de théoriciens canadiens pour analyser les propositions de ce genre. Les propositions retenues seraient organisées et réalisées par leurs auteurs en mettant à profit l'infrastructure existante, notamment le soutien administratif, à TRIUMF ou à l'Institut Perimeter.

La mise en place de programmes de visites d'été à l'Institut Perimeter et à TRIUMF, axés sur des thèmes particuliers et faisant l'objet d'une bonne publicité, serait également avantageuse pour la communauté. Pour que de tels programmes portent fruit et gagnent l'appui des théoriciens, ils devraient faire l'objet d'une large publicité, être fédérateurs et reposer sur une procédure transparente quant au choix des sujets et des thématiques.

L'infrastructure informatique, les grilles de calcul et le Centre de calcul ATLAS

Les ordinateurs sont un élément vital en physique subatomique pour l'analyse des données, la simulation des expériences et la réalisation de calculs théoriques complexes. Les expériences qui génèrent des flux de données continus en grande quantité et d'importantes analyses sont mieux servies par des centres de calcul spécialisés. Les autres applications peuvent être prises en charge par des infrastructures communes.

Les plus importantes expériences, comme celles qui seront réalisées au LHC, généreront des péta octets (1 Po = 10^6 Go) de données brutes chaque année[4]. Ces données seront habituellement archivées et reconstruites dans un premier temps au laboratoire. Elles seront également envoyées à des sites éloignés où elles seront analysées plus à fond et, lorsque de meilleures constantes d'étalonnage seront disponibles, elles seront traitées de nouveau afin d'optimiser l'information pouvant être extraites des données brutes. Comme ces activités mobilisent en continu des ressources imposantes, les installations de calcul communes ne peuvent répondre à leurs besoins. Le Fonds des occasions exceptionnelles de la FCI a récemment financé un centre informatique de niveau 1 (Tier-1), qui sera situé au centre TRIUMF, pour l'expérience ATLAS. Il est tout à fait raisonnable de prévoir que le collisionneur linéaire international (ILC) nécessitera une installation similaire vers la fin de la période décennale couverte par le présent rapport.

[4] Une année de données pour chaque expérience au LHC remplirait une pile de DVD aussi haute que la tour du CN!

Les grands projets incluent une variété d'activités qui se prêtent à l'utilisation d'installations de calcul communes, y compris les travaux d'analyse des différents physiciens et la production de simulations. Les projets menés au Canada et dont les besoin en calcul sont plus modestes font également une grande utilisation de ces installations. Citons à titre d'exemple l'expérience TWIST à TRIUMF et l'expérience BaBar, qui ont fait appel à des centres de calcul financés par la FCI comme WestGrid et un autre situé à Victoria pour une grande partie de leurs calculs. Ces activités ont pu être menée grâce aux investissements importants de la FCI, jumelés au soutien provincial. Nous sommes fortement favorables au renouvellement et à l'expansion de ces installations partagées qui, outre le Centre de calcul Tier-1 dédié d'ATLAS, constitueront l'épine dorsale du calcul en physique subatomique. Cette expansion est actuellement sous l'égide du Fonds des plateformes nationales de la FCI. Les besoins des théoriciens sont généralement comblés par ces centres partagés, même s'il existe une centrale de calcul dédiée à la CDQ sur réseau, équipée de 260 processeurs à l'University of Regina.

Mais l'existence de centres de calcul ne suffit pas à créer une infrastructure efficace, encore faut-il s'employer à élaborer des outils spécialisés pour leur exploitation et à établir un programme national pour coordonner leur utilisation. Au sein de la communauté canadienne de physique subatomique, l'élaboration d'outils normalisés pour l'utilisation efficace du réseau représente un effort soutenu et de taille, et le consortium HEPNET financé par le CRSNG en coordonne le réseautage au Canada et à l'étranger. La communauté canadienne de physique subatomique appuie sans réserve le maintien du financement du CRSNG à l'appui de l'infrastructure de réseau requise pour notre domaine, non financé par ailleurs par d'autres organismes.

Les chercheurs canadiens en physique subatomique sont également des usagers assidus de l'infrastructure du réseau CANARIE, dorsale Internet spécialisée à haut débit qui relie les universités et les établissements de recherche du pays. ATLAS Canada, en particulier, s'appuie fortement sur cette infrastructure à mesure qu'il développe les centres et les trousses d'outils qui seront utilisés pour le calcul en grille. Cette infrastructure de réseautage est essentielle pour la recherche universitaire concertée et doit être maintenue.

Résumé

L'expertise acquise au fil des années lors de l'élaboration et de la coordination d'accélérateurs et de faisceaux par TRIUMF, SNOLab et les universités des différentes régions du pays constitue un atout inestimable pour la physique subatomique canadienne. Cette infrastructure a également des retombées positives dans un contexte canadien élargi. Ces retombées sont difficiles à chiffrer, mais elles sont tangibles dans des domaines comme la production d'isotopes radioactifs pour les traitements médicaux, les mesures en science des matériaux exécutées au Centre canadien de rayonnement synchrotron et à TRIUMF, ainsi que la formation d'un personnel hautement qualifié qui quitte le milieu de la recherche au profit d'entreprises canadiennes de haute technologie.

La situation du financement de la physique subatomique est complexe en raison de la diversité des organismes et des ressources d'infrastructure qui appuient la communauté, et il y a place à l'amélioration et à la rationalisation. En outre, il faut par ailleurs accroître l'enveloppe de financement du CSS 19 pour soutenir le rythme de croissance de notre science ainsi que l'exploitation des nouvelles installations d'infrastructure. Enfin, nous appuyons la création d'un organe de supervision cohérent pour les différents mécanismes de financement connexes et les installations d'infrastructure.

7 Scénarios de financement analyse

La vision scientifique de la communauté canadienne de physique subatomique au cours des cinq à dix prochaines années est expliquée en détail dans les rapports reçus par le Comité de planification à long terme de la Division de physique nucléaire, de l'Institut de physique des particules (IPP), du SNOLab Underground Astroparticle Physics, ainsi que des théoriciens et des utilisateurs d'installations de calcul haute performance. Ces rapports sont répertoriés à la section 9.2. Le mandat du Comité (reproduit intégralement à la section 9.1) consistait à formuler des recommandations concernant la mise en œuvre de cette vision scientifique, c. à d. à la fois de trouver les moyens de mieux appuyer le programme actuel et d'intégrer les nouvelles initiatives proposées par une communauté scientifique en plein essor, compte tenu des contraintes financières des trois scénarios de financement suivants :

i) augmentation importante du financement disponible pour la discipline, de concert avec un doublement de l'enveloppe budgétaire confiée au CSS 19 au cours de la période décennale visée par le plan;
ii) maintien du financement actuel, le statu quo;
iii) financement nettement inférieur pour la discipline, correspondant à une coupure de 20 % de l'enveloppe budgétaire du CSS 19 au cours des dix années visées par le plan.

Suite à la vaste participation de la communauté, les délibérations du Comité concernant chacun de ces scénarios de financement ont conduit aux recommandations budgétaires présentées ci-après.

7.1 Structure des tableaux budgétaires

Un aspect central de la planification à long terme pour la communauté de physique subatomique repose sur la compréhension de l'équilibre variable entre les fonds de fonctionnement et les investissements en capital dans des équipements majeurs. Pour donner une orientation au CSS du CRSNG, le Comité a fait des prévisions concernant tous les projets d'immobilisations actuellement engagés, de même que ceux à venir, qui ont été décrits dans les rapports reçus des sous comités et dans les documents du CRSNG. Chaque tableau budgétaire présenté à la section 7.2 renferme une ventilation annuelle du capital actuellement engagé à même l'enveloppe budgétaire, y compris les engagements pris par le CSS dans le cadre du concours de 2006. À cette fin, on se base sur les projets hautement prioritaires pour calculer les engagements de capital actuels qui s'élèvent à 10,3 millions de dollars pour les cinq premières années du plan (2006 2010). Dans ces engagements de capital, ATLAS comprend le « coût à l'achèvement », ISAC correspond essentiellement aux spectromètres TIGRESS et EMMA, et « Polyvalence » correspond aux contributions à l'expérience Qweak et à l'expérience $\pi \rightarrow e\nu$ à TRIUMF.

Tubes de dérive à l'intérieur d'un accélérateur linéaire, à Fermilab. Le faisceau est accéléré le long de l'axe central des structures.

Salle de commande de la nouvelle installation ISAC-II, à TRIUMF, où les faisceaux d'ions radioactifs sont dirigés vers les appareillages expérimentaux.

En outre, les nouvelles initiatives d'immobilisations qui prendront place au cours de ces cinq premières années sont projetées sur une base annuelle et l'on utilise les mêmes rubriques, en ajoutant les investissements en capital des expériences au SNOLab à compter de 2007 dans la plupart des scénarios de financement. En ce qui concerne ATLAS, les nouvelles initiatives d'immobilisations pourraient inclure l'augmentation de la puissance de traitement du système de déclenchement de haut niveau ou les mises à niveau éventuelles des détecteurs et des systèmes de lecture. Les demandes se rapportant à ISAC porteront vraisemblablement sur les mises à niveau du spectromètre 8π de même que sur de plus petits montants pour d'autres instruments. On trouvera des précisions à cet égard dans le mémoire de physique nucléaire présenté au Comité. Dans le rapport qu'elle a présenté au Comité, l'équipe du SNOLab a établi que les demandes de fonds pour les expériences souterraines (DEAP, EXO, Majorana, PICASSO, SNO+, ...) totalisent plus de 20 millions de dollars. L'ordre de priorité de ces expériences et les recommandations concernant le choix de leur déploiement intégral au SNOLab relèvent du mandat du comité consultatif sur les expériences au SNOLab et le Comité de planification à long terme ne saurait présumer ici de ses conclusions. On s'attend à ce que l'expérience T2K sur les oscillations de neutrinos sur longue distance présente une demande pour les composantes électroniques du détecteur dans le cadre du concours de 2007, et peut être également une demande pour d'autres contributions au détecteur à compter de 2009. Enfin, les nouvelles initiatives d'immobilisations répertoriées sous la rubrique « Polyvalence » assureront le maintien d'une saine diversité des intérêts de la recherche canadienne en physique subatomique et peuvent inclure, sans pour autant s'y limiter, des investissements dans des expériences au JLab après sa mise à niveau à 12 GeV, les désintégrations rares, l'astrophysique des particules à haute énergie et la recherche sur l'antihydrogène.

Précisons que dans la section « Nouvelles initiatives d'immobilisations » des tableaux budgétaires, nous ne ratifions pas explicitement les détails de ces demandes. Il serait prématuré pour nous de le faire en l'absence de toutes les données techniques sur les coûts et de l'incidence de chaque proposition sur la physique. Toutefois, il est clair à nos yeux que ces catégories représentent les grandes initiatives de la communauté canadienne de physique subatomique, que chacune d'entre elles nécessite un investissement d'importance en capital humain et financier, qu'elle a un mérite scientifique appréciable et que sa mise en œuvre débouchera certainement sur de nouvelles possibilités et de nouvelles visions que la communauté voudra concrétiser. Bien que la répartition exacte des ressources en capital entre ces initiatives à venir reste à déterminer, et que la décision en incombe au CSS en fonction d'une l'évaluation plus fine des demandes de financement, la ventilation annuelle présentée dans les tableaux budgétaires illustre la façon dont le financement de ces nouvelles initiatives devrait être articulé au cours des cinq prochaines années, ainsi que les engagements de capitaux actuels, selon les contraintes de chaque scénario de financement.

Pour le second volet quinquennal du plan (2011–2015), les tableaux budgétaires présentent les sommes prévues, mais il faudra naturellement réexaminer le tout et obtenir des données supplémentaires au cours d'un exercice ultérieur de planification à long terme. Au cours de cette période, l'importante participation canadienne au collisionneur linéaire international (ILC) s'ajoutera aux grandes priorités du programme que représentent ATLAS, ISAC, SNOLab, T2K et Polyvalence, lesquelles devraient demeurer inchangées.

Au cours de cette période, l'orientation des scientifiques canadiens dont la recherche se situe à la frontière de l'énergie sera fortement influencée par les décisions internationales relatives au calendrier de développement de l'ILC et à la mise à niveau éventuelle du LHC. Cette réalité est expressément indiquée dans les tableaux par la jonction des lignes ATLAS et ILC pour la période visée. Bien qu'approximatives, les sommes indiquées dans les tableaux budgétaires pour la période allant de 2010 à 2015 présentent une orientation à long terme concernant les besoins en capital à venir au-delà de la période quinquennale du plan et, comme nous en traitons à la section 7.2, montrent également clairement l'incidence de chacun des scénarios de financement sur la réalisation de la vision scientifique à long terme de la physique subatomique canadienne.

Outre les projections relatives aux engagements de capitaux, les tableaux budgétaires de la section 7.2 renferment des recommandations pour les activités expérimentales, la théorie, le Programme d'accès aux installations majeures (AIM) et l'infrastructure, ainsi que la R et D et les instruments de recherche pour chacun des scénarios. Les montants affectés aux activités expérimentales correspondent à la somme de toutes les subventions (individuelles, groupes, projets) allouées aux expérimentateurs en physique subatomique et représentent le poste budgétaire le plus important. Bien que la ventilation de ces fonds entre les principaux projets ait été examinée par le Comité dans le cadre des divers scénarios en tant que « démonstration de principe » pour les totaux recommandés, les totaux partiels exacts dépendent fortement de divers paramètres impossibles à prévoir avec exactitude, notamment le temps de transition des chercheurs entre les divers projets et les disciplines de recherche que choisiront les nouveaux candidats. Le Comité a par conséquent choisi de présenter l'ensemble des activités expérimentales qui, à son avis, constituent un équilibre approprié entre les dépenses en immobilisations et les dépenses de fonctionnement selon les divers scénarios de financement. L'affectation des fonds à différents projets en fonction des critères d'excellence habituels et des besoins relève naturellement du CSS.

La ligne se rapportant aux activités théoriques (théorie) comprend presque exclusivement les subventions à la découverte, tandis que la ligne AIM/Infrastructure inclut les subventions du Programme AIM à l'appui de l'infrastructure de la physique subatomique dans les universités canadiennes, de même que la subvention à l'IPP. Enfin, la ligne R et D/Instruments représente le financement des travaux consacrés au développement de nouveaux instruments et de nouvelles orientations de recherche, notamment la R et D pour plusieurs expériences qui pourraient se dérouler au SNOLab, l'expérience GlueX envisagée au Jlab, l'ILC et la mise au point d'instruments en général. S'il est clair que les projets appuyés dans cette catégorie ne deviendront pas tous des expériences à part entière, l'exploration de nouvelles technologies n'est pas moins essentielle à la vitalité future de la physique subatomique et a par conséquent été considérée comme un poste budgétaire distinct par le Comité.

Comme dans le cas des projections d'immobilisations, les ventilations par exercice des fonds de fonctionnement sont fournies pour les cinq premières années du plan, et nous avons indiqué un total pour le second volet quinquennal. Les données antérieures du concours de 2005 sont également fournies à des fins de référence. À ces dépenses totales d'immobilisations et de fonctionnement s'ajoutent des remboursements provenant de l'enveloppe associée au Programme d'occasions spéciales de recherche (OSR) et le coût à l'achèvement d'ATLAS pour donner une idée des totaux par exercice ainsi que de l'excédent ou du déficit annuel et cumulatif de l'enveloppe en fonction de chaque scénario de financement.

La physique subatomique canadienne a connu une expansion rapide au cours de cinq dernières années et le nombre d'étudiants des cycles supérieurs dans cette discipline a progressé d'environ 55 % au cours de cette période (voir la figure 4 à la section 5.2). Nous nous attendons à ce que cette tendance se poursuive au cours des cinq prochaines années, à mesure que les professeurs nouvellement engagés établiront leurs programmes de recherche et y attireront de nouveaux étudiants. Comme facteur de mérite pour quantifier le niveau de soutien opérationnel des différents scénarios budgétaires, le Comité a utilisé le rapport des subventions de fonctionnement totales accordées par le CSS 19 sur le nombre total d'étudiants canadiens des cycles supérieurs en physique subatomique. Ce rapport est ensuite normalisé à la valeur de 1 au début du plan quinquennal en 2001. La figure 5 montre l'évolution de ce rapport au cours des cinq premières années, et l'on peut voir que l'augmentation d'environ 55 % du nombre d'étudiants des cycles supérieurs n'est pas assortie de majorations proportionnelles de l'enveloppe du CSS 19, ce qui nous conduit à une baisse régulière des fonds de fonctionnement par personne hautement qualifiée formée. Nous avons projeté ce rapport sur la période quinquennale suivante pour chacun des scénarios envisagés, en utilisant les recommandations de financement des tableaux budgétaires et en retenant l'hypothèse que le nombre d'étudiants de deuxième et troisième cycles inscrits en physique subatomique continuera à croître de façon linéaire au rythme actuel au cours des cinq prochaines années. De fait, au moins 25 % des chercheurs en physique subatomique au Canada ont été embauchés au cours des cinq dernières années. Leurs groupes de recherche ne font que commencer à prendre leur essor, et l'augmentation du nombre d'étudiants pourrait être encore plus forte au cours des cinq prochaines années.

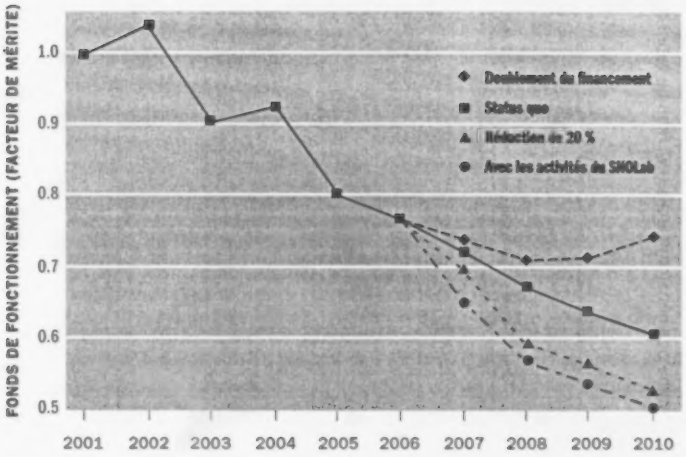


Figure 5 : Facteur de mérite des fonds de fonctionnement pour les quatre scénarios de financement envisagés par le Comité de planification à long terme.

Le facteur de mérite est défini comme étant le rapport des subventions de fonctionnement totales accordées par le CSS 19 sur le nombre total d'étudiants des cycles supérieurs inscrits en physique subatomique au Canada, normalisé à la valeur de 1 en 2001. On prévoit un accroissement linéaire du nombre d'étudiants des cycles supérieurs au cours des cinq prochaines années, au même rythme de croissance moyenne qu'au cours des cinq dernières années (voir la figure 4). Le financement de l'enveloppe du CSS 19 selon le scénario du statu quo représenterait par conséquent une baisse régulière des fonds de fonctionnement par personne hautement qualifiée formée, comme ce fut le cas ces dernières années.

Les projections budgétaires de la section 7.2 ne concernent que l'enveloppe de physique subatomique du CRSNG, et le Comité a posé plusieurs hypothèses concernant les sources de financement extérieures à l'enveloppe. Entre autres, on suppose que TRIUMF continuera à être financé à son niveau actuel, voire à un niveau supérieur, que le financement des grands centres de calcul en physique subatomique continuera à provenir de sources extérieures à l'enveloppe, que le financement de CANARIE sera maintenu au niveau actuel, voire à un niveau supérieur, et que les dépenses d'exploitation pour les nouvelles installations du SNOLab seront assumées par des fonds autres que ceux de l'enveloppe du CSS 19. Cette dernière hypothèse revêt une importance particulière et le Comité en traite plus à fond à la section 7.3.

Module FCAL (calorimètre électromagnétique frontal) pour l'expérience ATLAS, construit à la Carleton University, avant sa livraison et son installation au CERN.

7.2 Scénarios de financement

Scénario de doublement du financement

Tableau 1 : Doublement du budget (en millions $) – Comité de planification à long terme de la physique subatomique canadienne

Exercice	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	Σ 06-10	Σ 11-15
Capital engagé								
ATLAS		0,6	0,6	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0
ISAC		1,9	2,2	1,6	0,5	0,5	6,8	0,0
T2K		0,6	0,9	0,6	0,0	0,0	2,0	0,0
Polyvalence		0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Total partiel		**3,4**	**3,7**	**2,2**	**0,5**	**0,5**	**10,3**	**0,0**
Nouvelles initiatives d'immobilisations								
ATLAS				0,2	0,2	0,4	0,8	} 18,0
ILC								
ISAC					0,8	0,8	1,6	8,0
SNOLab			1,5	3,5	4,0	3,7	12,7	10,0
T2K			0,3	0,5	0,6	0,6	2,0	8,5
Polyvalence			0,2	0,1	0,8	1,2	2,3	7,5
Total partiel			**2,0**	**4,2**	**6,4**	**6,7**	**19,3**	**52,0**
Capital total	**4,1**	**3,4**	**5,8**	**6,4**	**6,9**	**7,2**	**29,6**	**52,0**
Activités expérimentales	**13,0**	**13,3**	**13,6**	**13,7**	**14,9**	**16,8**	**72,3**	**102,6**
Théorie	**3,0**	**3,2**	**3,3**	**3,4**	**3,5**	**3,7**	**17,1**	**25,2**
AIM/Infrastructure	**1,8**	**1,9**	**2,0**	**2,1**	**2,2**	**2,3**	**10,3**	**14,1**
R et D/Instruments	**0,6**	**0,5**	**0,6**	**0,6**	**0,8**	**0,8**	**3,1**	**3,7**
Dépenses	**22,6**	**22,2**	**25,2**	**26,2**	**28,2**	**30,7**	**132,4**	**197,5**
Remboursements	-0,6	0,1	-0,1	0,3	0,3	0,3	0,9	0,0
TOTAL	**21,9**	**22,3**	**25,1**	**26,5**	**28,5**	**31,0**	**133,3**	**197,5**
Enveloppe	22,2	22,5	24,4	26,4	28,6	31,0	132,9	197,5
Excédent/Déficit	0,3	0,3	-0,7	-0,1	0,1	0,0	-0,4	0,0
Excédent/Déficit cumulatif	0,4	0,7	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Selon le scénario du doublement des fonds, l'enveloppe du CSS 19, dont la valeur était de 22,5 millions de dollars pour le concours de 2006, est censée doubler d'ici le concours de 2015, ce qui correspond à une augmentation de 8,25 % par an. Les recommandations budgétaires du Comité selon ces conditions de financement sont présentées au tableau 1.

Comme l'illustre le tableau, le Comité recommande des augmentations modestes dans toutes les catégories, c. à d. Activités expérimentales, Théorie, AIM/Infrastructure et R et D/Instruments. Ces augmentations des fonds de fonctionnement assureraient le niveau d'appui et le nombre de PHQ requis pour exploiter pleinement le potentiel scientifique des investissements majeurs en capital qui ont été réalisés dans les programmes phares de la communauté canadienne de physique subatomique au cours des dix dernières années, de même que le maintien d'une saine diversité des intérêts de recherche dans notre discipline.

Avec ce scénario de financement, les investissements en capital requis permettraient de réaliser une part importante de notre vision scientifique pour la physique subatomique canadienne comme nous l'avons exposé ci-dessus dans le présent document. Comme l'indique le tableau 1, les capitaux nécessaires pour les mises à niveau du détecteur ou du système de déclenchement de haut niveau d'ATLAS seront disponibles dans les cinq premières années du plan, et un montant suffisant pourrait être consacré aux programmes scientifiques, à la fois au LHC mis à niveau et à l'ILC, afin d'assurer un rôle de premier plan aux scientifiques canadiens. De même, les capitaux pour les mises à niveau ultérieures du détecteur ISAC seraient disponibles dès les cinq premières années du plan, et l'on pourrait envisager des investissements en capital majeurs pour un nouveau détecteur afin qu'ISAC demeure une installation de faisceaux d'ions radioactifs de pointe tout au long de la période allant de 2010 à 2015. De grands projets d'immobilisations pour les expériences du SNOLab pourraient être réalisés à chacune des périodes quinquennales et commencer dès 2007, jusqu'à concurrence de plus de 20 millions de dollars au cours de la durée du plan. Ce niveau d'investissement, concentré sur un petit nombre d'expériences incontournables sur le plan scientifique, permettrait aux Canadiens de demeurer des chefs de file mondiaux de l'astrophysique des particules en laboratoire souterrain. Le scénario de doublement du financement fournirait des capitaux pour les composantes électroniques du T2K, de même que des contributions supplémentaires au cours des cinq premières années du plan et, au cours de la deuxième période quinquennale, permettrait à la communauté canadienne de jouer un rôle majeur dans une expérience sur les oscillations des neutrinos sur longue distance qui pourrait prendre place dans la foulée des résultats du T2K. Les investissements en capital prévus par ce scénario au cours des cinq premières années du plan permettraient également de maintenir et de favoriser la diversité actuelle en physique subatomique et, au cours de la deuxième période quinquennale, d'importants investissements en capital pourraient appuyer les nouvelles initiatives de recherche qui, à coup sûr, seront proposées par les jeunes scientifiques qui se joindront à la communauté canadienne de physique subatomique.

Globalement, le scénario de financement prévoyant un doublement des fonds permettrait à la physique subatomique canadienne de concrétiser la vision scientifique décrite à la section 3. Le Comité se doit de souligner, cependant, que ce scénario est le seul à permettre des réalisations de cet ordre. Au cours des dix dernières années, le Canada a réalisé d'importants investissements en capital dans des installations phares de physique subatomique comme ATLAS au LHC (environ 70 millions de dollars), ISAC (environ 115 millions de dollars) et le SNOLab (environ 45 millions de dollars). Ce n'est qu'en augmentant de façon proportionnelle l'enveloppe du CSS 19 du CRSNG à raison de 8,25 % par an, voire plus, selon le scénario que nous avons exploré, que la physique subatomique canadienne sera en mesure d'exploiter pleinement le potentiel scientifique de ces investissements.

Scénario du statu quo

Selon le scénario du statu quo, l'enveloppe du CSS-19 d'une valeur de 22,5 millions au concours de 2006 serait portée à environ 22,8 millions de dollars pour le concours de 2007 à l'issue de l'ajustement final de l'exercice de réaffectation de fonds de 2002 et d'une augmentation modeste pour les nouveaux candidats. Pour le concours de 2008, dans l'hypothèse d'une autre augmentation modeste pour les nouveaux candidats, le montant serait porté à 23 millions de dollars. Pour le reste du plan, le Comité a adopté l'hypothèse prudente d'une enveloppe plafonnée à 23 millions de dollars, sans aucune augmentation, que ce soit pour l'inflation ou les nouveaux candidats.

Les recommandations budgétaires pour ce scénario sont présentées au tableau 2. Selon ce cas de figure, le Comité recommande le plafonnement de toutes les catégories de dépenses, à savoir Activités expérimentales, Théorie, AIM/Infrastructure et R et D/Instruments, à peu près à leur valeur absolue actuelle. Il convient de rappeler une fois encore que ce choix représenterait une véritable baisse des fonds de fonctionnement au cours du plan décennal, à la fois en raison de l'inflation et de l'augmentation escomptée du nombre de scientifiques de la discipline. Une telle baisse de soutien, alors que le nombre de chercheurs est appelé à augmenter, serait préjudiciable et empêcherait les chercheurs canadiens en physique subatomique d'exploiter le potentiel scientifique des grands projets d'immobilisations des dix dernières années. De plus, cela limiterait le nombre de personnes hautement qualifiées qu'il serait possible de former, mais cette réduction des fonds de fonctionnement serait le seul moyen permettant de dégager suffisamment de capitaux pour faire les investissements requis afin de préserver les aspects principaux de la vision scientifique à long terme de la physique subatomique canadienne. Même avec ces restrictions touchant le financement des coûts de fonctionnement, le scénario du statu quo nécessiterait un sérieux remaniement à la baisse de cette vision.

Tableau 2 : Budget selon le scénario de statu quo (en millions $) – Comité de planification à long terme de la physique subatomique canadienne

Exercice	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	Σ 06-10	Σ 11-15
Capital engagé								
ATLAS		0,6	0,6	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0
ISAC		1,9	2,2	1,6	0,5	0,5	6,8	0,0
T2K		0,6	0,9	0,6	0,0	0,0	2,0	0,0
Polyvalence		0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Total partiel		**3,4**	**3,7**	**2,2**	**0,5**	**0,5**	**10,3**	**0,0**
Nouvelles initiatives d'immobilisations								
ATLAS					0,1	0,2	0,3	} 10,0
ILC								
ISAC					0,5	0,5	1,0	4,0
SNOLab			0,5	2,0	2,0	2,5	7,0	5,0
T2K			0,3	0,5	0,2	0,0	1,0	0,0
Polyvalence			0,1	0,0	0,3	0,3	0,7	1,8
Total partiel			**0,9**	**2,5**	**3,1**	**3,5**	**10,0**	**20,8**
Capital total	**4,1**	**3,4**	**4,6**	**4,6**	**3,6**	**4,0**	**20,3**	**20,8**
Activités expérimentales	**13,0**	**13,3**	**13,3**	**13,3**	**13,3**	**13,3**	**66,5**	**66,5**
Théorie	**3,0**	**3,2**	**3,2**	**3,2**	**3,3**	**3,3**	**16,2**	**16,5**
AIM/Infrastructure	**1,8**	**1,9**	**1,9**	**1,9**	**1,9**	**1,9**	**9,4**	**9,7**
R et D/Instruments	**0,6**	**0,5**	**0,2**	**0,3**	**0,3**	**0,3**	**1,5**	**1,5**
Dépenses	**22,6**	**22,2**	**23,2**	**23,3**	**22,4**	**22,8**	**113,9**	**115,0**
Remboursements	-0,6	0,1	-0,1	0,3	0,3	0,3	0,9	0,0
TOTAL	**21,9**	**22,3**	**23,1**	**23,6**	**22,7**	**23,1**	**114,8**	**115,0**
Enveloppe	22,2	22,5	22,8	23,0	23,0	23,0	114,3	115,0
Excédent/Deficit	0,3	0,3	-0,4	-0,6	0,3	-0,1	-0,5	0,0
Excédent/Déficit cumulatif	0,4	0,7	0,3	-0,2	0,1	0,0	0,0	0,0

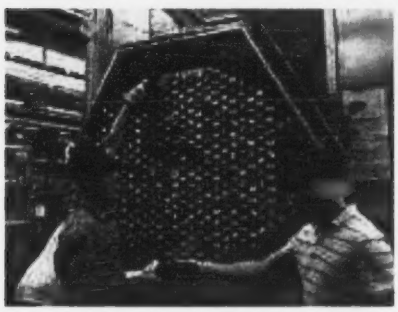
Comme l'indique le tableau 2, un montant réduit serait disponible pour les mises à niveau d'ATLAS au cours des cinq premières années du plan. Le capital disponible au cours de la deuxième période quinquennale du plan serait suffisant pour permettre à l'équipe canadienne de jouer un rôle important dans le programme scientifique, mais dans un seul – l'ILC ou le LHC mis au niveau – et le capital disponible pour les contributions à un tel détecteur, aux frontières de l'énergie, serait encore inférieur à la norme établie par les investissements passés. Le capital disponible pour les mises à niveau du détecteur ISAC serait réduit au cours de la première tranche quinquennale du plan et, comparativement au tableau 1, il serait pratiquement amputé de moitié au cours de la seconde période quinquennale, ce qui compromettrait le leadership mondial du programme scientifique ISAC. Dans le scénario du statu quo, les nouveaux investissements en capital les plus importants au cours des cinq premières années du plan sont associés aux expériences du SNOLab. Là encore, les investissements progressifs seraient retardés et le financement total ne permettrait à la communauté canadienne de jouer un rôle de premier plan que dans le cadre d'une seule expérience majeure au SNOLab. Les composantes électroniques pour l'expérience T2K demeureraient une priorité, mais il serait impossible de prévoir une autre contribution en capital pour le détecteur au cours des cinq premières années, ou d'assurer aux Canadiens un rôle majeur dans le cadre d'une expérience subséquente sur les oscillations des neutrinos à distance, au cours des cinq dernières années du plan décennal. Une enveloppe plafonnée réduirait aussi considérablement le capital disponible pour assurer la polyvalence du milieu scientifique et réduirait de manière draconienne la portée des nouvelles initiatives au cours de la seconde période quinquennale du plan.

Vue aérienne de TRIUMF, le laboratoire national canadien de physique nucléaire et subatomique, à Vancouver (Colombie Britannique).

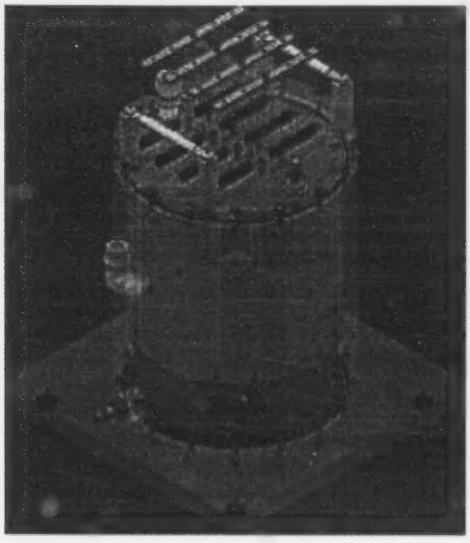
Tableau 3 : Budget amputé de 20 % (en millions $) – Comité de planification à long terme de la physique subatomique canadienne

Exercice	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	Σ 06-10	Σ 11-15
Capital engagé								
ATLAS		0,6	0,6	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0
ISAC		1,9	2,2	1,6	0,5	0,5	6,8	0,0
ISAC		1,9	2,2	1,6	0,5	0,5	6,8	0,0
T2K		0,6	0,9	0,6	0,0	0,0	2,0	0,0
Polyvalence		0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Total partiel		**3,4**	**3,7**	**2,2**	**0,5**	**0,5**	**10,3**	**0,0**
Nouvelles initiatives d'immobilisations								
ATLAS ILC					0,1	0,2	0,3	} 6,0
ISAC					0,5	0,5	1,0	3,5
SNOLab			0,5	2,0	2,0	2,5	7,0	4,5
T2K			0,3	0,5	0,2	0,0	1,0	0,0
Polyvalence			0,1	0,0	0,3	0,3	0,7	0,0
Total partiel			**0,9**	**2,5**	**3,1**	**3,5**	**10,0**	**14,0**
Capital total	**4,1**	**3,4**	**4,6**	**4,6**	**3,6**	**4,0**	**20,3**	**14,0**
Activités expérimentales	**13,0**	**13,3**	**13,0**	**11,4**	**11,4**	**11,4**	**60,5**	**56,0**
Théorie	**3,0**	**3,2**	**3,1**	**3,1**	**3,1**	**3,1**	**15,6**	**15,5**
AIM/Infrastructure	**1,8**	**1,9**	**1,8**	**1,8**	**1,8**	**1,8**	**9,2**	**9,0**
R et D/Instruments	**0,6**	**0,5**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**1,3**	**0,0**
Dépenses	**22,6**	**22,2**	**22,8**	**21,2**	**20,1**	**20,5**	**106,8**	**94,5**
Remboursements	-0,6	0,1	-0,1	0,3	0,3	0,3	0,9	0,0
TOTAL	**21,9**	**22,3**	**22,7**	**21,5**	**20,4**	**20,8**	**107,7**	**94,5**
Enveloppe	22,2	22,5	22,0	21,4	20,9	20,4	107,2	94,5
Excédent/Deficit	0,3	0,3	-0,7	0,0	0,5	-0,5	-0,5	0,0
Excédent/Déficit cumulatif	0,4	0,7	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0

Le plafonnement du financement de l'enveloppe du CSS-19 sur la période visée est de toute évidence un cas de figure qui, à la fois limiterait considérablement la capacité de la physique subatomique canadienne à exploiter les immobilisations majeures effectués au cours des dix dernières années et compromettrait sa capacité de concrétiser la vision scientifique à long terme décrite à la section 3. Le Comité de planification à long terme considère par conséquent qu'il est essentiel d'augmenter substantiellement le financement de l'enveloppe afin que la physique subatomique canadienne, en plein essor, puisse réaliser pleinement son potentiel scientifique.



Étudiants travaillant sur le calorimètre à fluorure de baryum, sur le spectromètre photonique à double bras au Microtron de Mainz (Allemagne).



Dessin technique d'une cellule de test utilisée pour évaluer le système de lecture du détecteur gazeux à micro-motifs, pour les chambres à projection temporelle (TPC). Les chambres TPC, qui font l'objet d'intenses travaux de R et D, constitueront probablement le cœur des détecteurs du collisionneur ILC.

Scénario de réduction de 20 %

Selon le scénario prévoyant une réduction de 20 % du financement, l'enveloppe de 22,5 millions de dollars dont disposait le CSS 19 au concours de 2006 serait amputée de 2,45 % par an pour atteindre 81 % de sa valeur actuelle au concours de 2015. Les recommandations budgétaires du Comité dans le cadre de ce scénario de financement sont présentées au tableau 3. De l'avis du Comité, si les chercheurs devaient composer avec un tel scénario, il faudrait protéger les immobilisations au cours des cinq premières années du plan de façon à préserver certaines perspectives d'avenir pour la discipline, au cas où la situation s'améliorerait au cours des dernières années. Les investissements en capital recommandés au cours des cinq premières années demeureraient par conséquent inchangés par rapport au tableau 2, et les réductions sévères, dans ce scénario, au cours des cinq premières années ne toucheraient par conséquent que les budgets de fonctionnement. La plus grande partie de ces réductions amputeraient nécessairement les activités expérimentales qui seraient réduites à un niveau qui, outre qu'il restreindrait la diversité de la physique subatomique canadienne, porterait aussi atteinte à sa capacité de tirer vraiment parti des immobilisations majeures de la dernière décennie.

Au cours des cinq premières années de ce scénario de réduction du financement de 20 %, les activités seraient réduites à un niveau à peine suffisant pour assurer la participation à une série limitée d'expériences. Les coupures associées à ce scénario pendant toute la durée du plan devraient par conséquent être faites à même les investissements en capital prévus au cours de la deuxième période quinquennale. Comme l'indique le tableau 3, le capital limité disponible au cours de la seconde période quinquennale permettrait uniquement une participation mineure au LHC mis à niveau ou à l'ILC et restreindrait gravement les investissements en capital dans les détecteurs d'ISAC et du SNOLab, supprimerait la diversité de la communauté scientifique et l'empêcherait d'investir dans la R et D et de nouveaux axes de recherche.

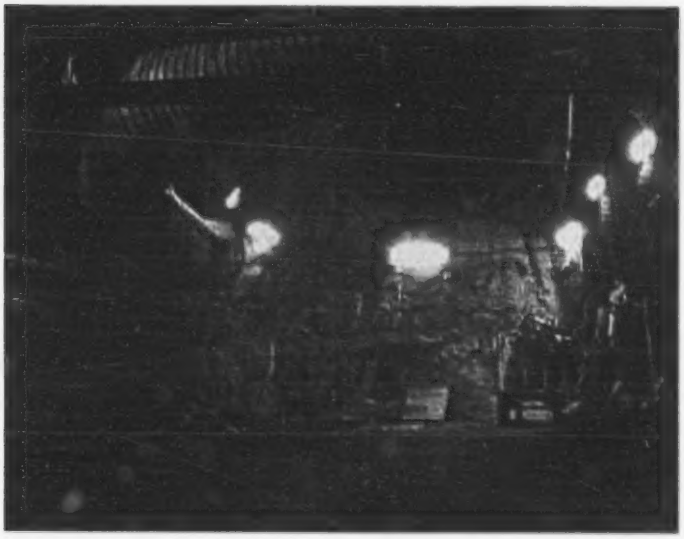
Le scénario prévoyant une réduction du financement de 20 % serait par conséquent gravement préjudiciable à la physique subatomique canadienne. Dans un premier temps, nous perdrions la capacité d'exploiter rapidement et pleinement le potentiel scientifique des investissements passés, tandis qu'à plus long terme, la polyvalence des équipes canadiennes s'évanouirait et les perspectives offertes par l'ensemble des programmes hautement prioritaires de la communauté seraient sévèrement réduites.

7.3 Activités du SNOLab

Comme nous l'avons mentionné à la section 7.1, toutes les recommandations budgétaires de la section 7.2 ont été formulées en postulant que le financement des dépenses de fonctionnement du SNOLab proviendrait de sources extérieures à l'enveloppe du CSS 19. Comme la source de financement des activités du SNOLab n'a pas encore été précisée, le Comité a examiné un scénario supplémentaire, au-delà de ce qui était expressément prévu dans son mandat, reposant sur l'hypothèse du statu quo, avec financement des activités du SNOLab à même l'enveloppe du CSS 19. Les autres hypothèses concernant l'enveloppe demeurent les mêmes que celles décrites à la section 7.2.

Les projections budgétaires de ce scénario sont présentées au tableau 4. On peut constater que les conséquences négatives pour la physique subatomique canadienne seraient immédiates et graves. Dès l'achèvement de la construction du SNOLab au cours du prochain exercice, il faudrait assumer les coûts de fonctionnement du laboratoire et réduire immédiatement les activités expérimentales à un niveau inférieur à celui indiqué au tableau 3. Une telle diminution réduirait le nombre d'étudiants formés, compromettrait gravement la capacité des scientifiques à extraire des résultats intéressants de toutes les expériences menées à ATLAS, ISAC, SNOLab et T2K, et porterait un coup fatal à la diversité de notre communauté scientifique. Les augmentations récentes du financement des théoriciens seraient annulées, conduisant probablement à l'exode de théoriciens de premier ordre et à l'incapacité de recruter de nouveaux talents. Les investissements au titre du Programme AIM ou de l'infrastructure seraient supprimés, entraînant la perte de certains groupes assurant l'infrastructure universitaire et une réduction du nombre de scientifiques de l'IPP voués à la recherche, ce qui détruirait à toutes fins pratiques la capacité de la communauté à investir dans la R et D en vue de nouvelles initiatives.

Outre les réductions draconiennes touchant les fonds de fonctionnement, la nécessité de financer les activités du SNOLab à même l'enveloppe du CSS 19 obligerait à annuler toutes les autres nouvelles initiatives d'immobilisation prévues dans les cinq prochaines années, à l'exception des expériences du SNOLab. On

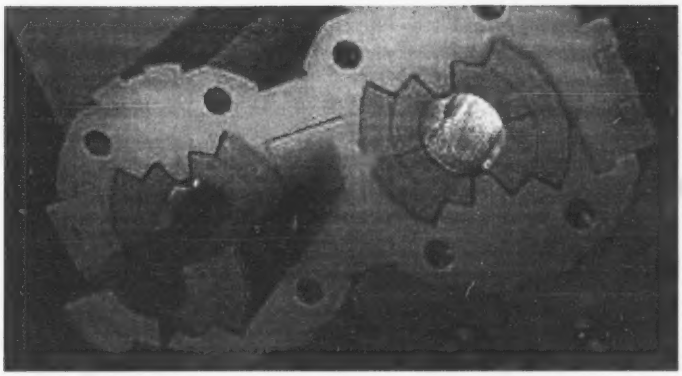


Excavation pour le nouveau laboratoire SNOLab près de Sudbury (Ontario), près de 2 km sous terre.

manquerait de fonds pour ATLAS, pour les mises à niveau du détecteur d'ISAC ou pour les composantes électroniques de T2K, et il faudrait supprimer complètement les investissements en capital dans d'autres volets de la physique subatomique. Et, même avec ces compressions, les investissements nécessaires aux expériences du SNOLab seraient retardés à tout le moins jusqu'en 2008, voire 2009, et ne représenteraient qu'une petite portion du montant requis pour que les scientifiques canadiens soient aux commandes d'une quelconque expérience majeure au SNOLab. Au cours de la seconde période quinquennale du plan, la participation du Canada, soit à l'ILC ou au LHC mis à niveau, serait réduite à un rôle accessoire et l'on ne disposerait que d'un capital minimal pour les investissements dans les détecteurs d'ISAC et du SNOLab.

Budget selon le scénario de statu quo avec les activités du SNOLab à même l'enveloppe du CSS 19 (en millions $) – Comité de planification à long terme de la physique subatomique canadienne.

Exercice	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	Σ 06-10	Σ 11-15
Capital engagé								
ATLAS		0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0
ISAC		1.9	2.2	1.6	0.5	0.5	6.8	0.0
T2K		0.6	0.9	0.6	0.0	0.0	2.0	0.0
Polyvalence		0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
Total partiel		3.4	3.7	2.2	0.5	0.5	10.3	0.0
Nouvelles initiatives d'immobilisations								
ATLAS							0.0	5.0
ILC							0.0	
ISAC							0.0	3.0
SNOLab			0.0	1.0	1.0	1.5	3.5	5.0
T2K							0.0	0.0
Polyvalence							0.0	0.0
Total partiel			**0.0**	**1.0**	**1.0**	**1.5**	**3.5**	**13.0**
Capital total	**4.1**	**3.4**	**3.7**	**3.2**	**1.5**	**2.0**	**13.8**	**13.0**
Activités expérimentales	**13.0**	**13.3**	**11.9**	**11.0**	**11.0**	**11.0**	**58.2**	**55.0**
Théorie	**3.0**	**3.2**	**3.1**	**3.0**	**3.0**	**2.9**	**15.1**	**14.5**
AIM/Infrastructure	**1.8**	**1.9**	**1.7**	**1.6**	**1.5**	**1.5**	**8.1**	**7.5**
R et D/Instruments	**0.6**	**0.5**	**0.2**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.6**	**0.0**
Fonctionnement du SNOLab			**3.0**	**5.0**	**5.0**	**5.0**	**18.0**	**25.0**
Dépenses	**22.6**	**22.2**	**23.5**	**23.8**	**22.0**	**22.4**	**113.8**	**115.0**
Remboursements	-0.6	0.1	-0.1	0.3	0.3	0.3	0.9	0.0
TOTAL	**21.9**	**22.3**	**23.5**	**24.1**	**22.3**	**22.7**	**114.7**	**115.0**
Enveloppe	22.2	22.5	22.8	23.0	23.0	23.0	114.3	115.0
Excédent/Déficit	0.3	0.3	-0.7	-1.1	0.8	0.3	-0.4	0.0
Excédent/Déficit cumulatif	0.4	0.7	0.0	-1.1	-0.3	0.0	0.0	0.0



Cœur d'un aimant dipolaire supraconducteur du LHC. On voit clairement les deux chambres dans lesquelles les deux faisceaux de protons circulent.

Il est clair, lorsqu'on examine les projections budgétaires du tableau 4, que les fonds de fonctionnement d'un laboratoire d'envergure majeure comme le SNOLab ne sont tout simplement pas à la portée de l'enveloppe du CSS 19 à son niveau actuel, et que cette situation réduirait la communauté canadienne à une poignée de personnes présentes au SNOLab, mais incapables de participer de manière significative aux expériences prévues dans leurs propres installations. Ce scénario détruirait complètement la vision de la communauté canadienne de physique subatomique, qui aspire à conserver sa position enviable de chef de file mondial dans des créneaux clés de la recherche dans ce domaine.

Le Comité de planification à long terme estime qu'il faut établir une distinction très nette entre le déroulement de l'actuelle expérience au SNO et son exploitation future. Le déroulement de l'actuelle expérience au SNO (à hauteur de 2,3 millions de dollars, 2,8 millions et 2 millions en 2005, 2006 et 2007, respectivement) a été et continue d'être appuyé par l'enveloppe du CSS 19. Compte tenu de la baisse rapide du financement du SNO après 2007, après que l'expérience aura cessé, on serait tenté de penser qu'il serait possible de rediriger ces fonds pour absorber en partie le coût de fonctionnement du SNOLab. Cet argument, toutefois, ne tient pas compte de la planification à long terme en physique subatomique qui prévoit que la mise hors service progressive de certaines expériences (dans ce cas SNO) coïncide avec le démarrage progressif d'autres expériences. En outre, on néglige le fait que les expériences futures au SNOLab nécessiteront également des fonds de fonctionnement, analogues aux fonds du SNO, pour les activités expérimentales qui s'y dérouleront, indépendamment des services de base qu'il assurera. Pour éviter la situation catastrophique décrite au tableau 4, il est essentiel de prévoir que le coût de fonctionnement intégral du SNOLab (estimé à quelque 5 millions de dollars par an) soit assuré par des sources de financement extérieures à l'enveloppe du CSS 19.

8
Conclusion et sommaire des recommandations

Le Comité constate que la physique subatomique canadienne se porte fort bien. Le renouvellement et le renforcement récents du corps professoral, ainsi que d'importants investissements en capital ces dernières années, lui ont permis de poursuivre ses projets prioritaires et de se donner les moyens de jouer un rôle central dans ce domaine passionnant au cours des prochaines années.

La vision de notre communauté scientifique est claire. À court terme, il s'agit d'exploiter les installations et les expériences de calibre mondial que nous avons contribué à mettre en place, et de participer à titre de partenaires de premier plan aux travaux passionnants de pointe en physique qui y seront réalisés.

Par conséquent, les premières recommandations du Comité reformulent comme suit ces priorités :

> **Recommandation scientifique :** Les projets les plus prioritaires pour la communauté canadienne de physique subatomique au cours des cinq prochaines années devraient être :
>
> - l'exploitation optimale du potentiel de découvertes en nouvelle physique aux plus hautes énergies sur terre, à l'aide du détecteur ATLAS du LHC, au CERN;
> - le parachèvement et l'exploitation optimale de la principale installation mondiale de faisceaux radioactifs au laboratoire ISAC (TRIUMF) et la conception connexe d'instruments des plus perfectionnées, en physique nucléaire et en astrophysique nucléaire;

- le parachèvement du SNOLab et son utilisation comme laboratoire souterrain offrant le plus faible rayonnement parasite au monde, y compris la participation à une série d'expériences afin de tirer parti de cet environnement exceptionnel;
- la participation canadienne à la construction et au déroulement de l'expérience de neutrinos T2K afin d'étudier la nature des neutrinos dans une plage d'énergie unique.

À plus long terme, la communauté internationale a établi que la construction et l'exploitation du collisionneur linéaire international sera le prochain grand projet prioritaire en physique des particules, afin de pouvoir exploiter les découvertes qui auront été faites au LHC. Le Canada doit être un participant important à ce projet. La deuxième recommandation prioritaire du Comité est donc la suivante :

> **Recommandation scientifique :** La communauté canadienne de physique subatomique devrait poursuivre vigoureusement ses travaux de R et D au cours des prochaines années afin de se donner les moyens de participer de façon importante à l'ILC au cours de la deuxième partie quinquennale du plan, et elle devrait participer pleinement aux délibérations internationales au sujet de l'emplacement et du calendrier de l'ILC.

Le Comité estime que l'actuelle polyvalence de la physique subatomique canadienne, y compris son important volet théorique, est un atout non négligeable qui nous permet de poursuivre de nouvelles initiatives, d'assumer de nouvelles responsabilités de leadership et d'offrir à nos étudiants un vaste aperçu de la recherche en physique subatomique. Notre prochaine recommandation est donc formulée comme suit :

Représentation artistique d'une région d'interaction souterraine au collisionneur LHC du CERN.

Recommandation scientifique : La communauté canadienne de physique subatomique devrait participer à un ensemble diversifié d'expériences de moindre envergure, afin d'assurer la polyvalence au sein de la discipline et d'être en mesure de saisir les nouvelles possibilités lorsqu'elles surgissent.

Toutefois, cette vision présente de sérieux défis pour notre communauté, nos organismes subventionnaires et nos partenaires. En effet, d'importants capitaux ont été alloués ces dernières années, sans que l'on définisse une source correspondante de fonds de fonctionnement. Nos deux prochaines recommandations portent sur cette situation :

Recommandation de financement : Des mesures immédiates doivent être prises pour assurer de nouveaux fonds de fonctionnement à l'installation SNOLab, récemment financée par la FCI. Comme la construction du SNOLab est presque terminée, ces fonds sont requis de toute urgence.

Recommandation de financement : Comme les scénarios de statu quo et de réduction de 20 % de l'enveloppe du CRSNG en physique subatomique se traduiraient par l'impossibilité pour les physiciens subatomiques canadiens d'exploiter les investissements récents et importants faits pour les projets les plus prioritaires, et que cette perte serait inacceptable, de nouveaux fonds substantiels doivent être alloués à l'enveloppe du CRSNG en physique subatomique, comme il est stipulé dans le scénario prévoyant le doublement des fonds.

Les récents investissements en capital de la FCI dans notre domaine sont nécessaires et bienvenus. Toutefois, on n'a pas tenu compte des fonds de fonctionnement actuellement requis. Ce problème n'est pas propre à notre domaine, ce qui nous amène à notre prochaine recommandation :

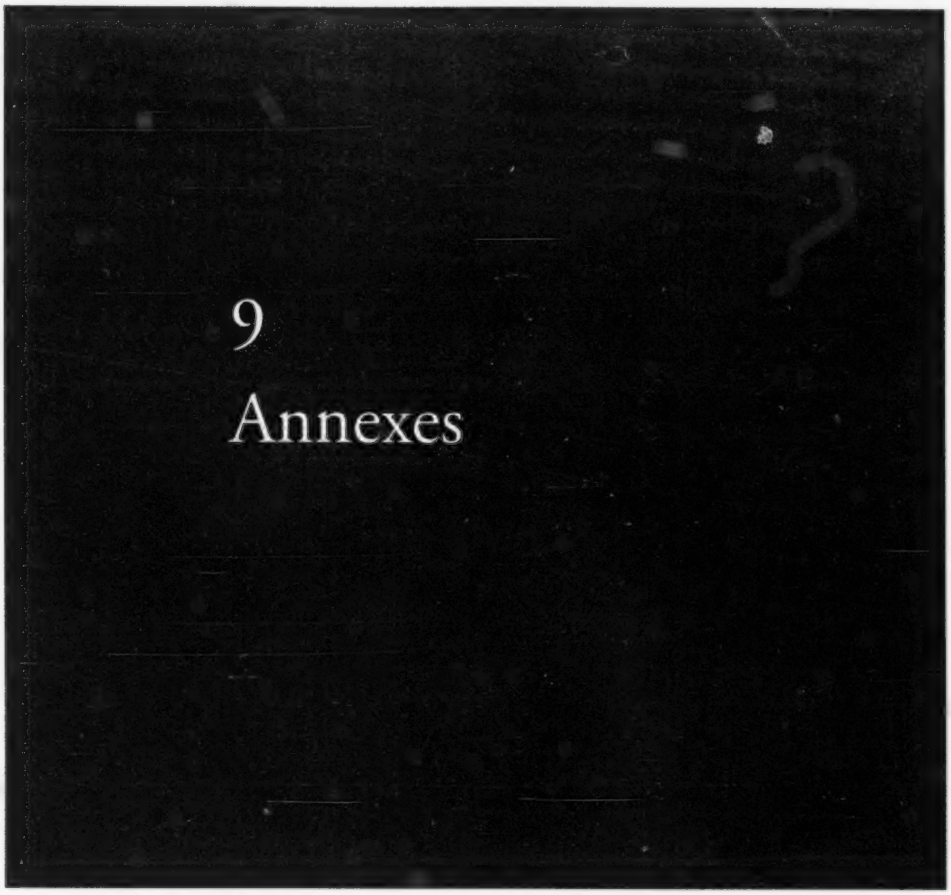
Recommandation stratégique : Un mécanisme général devrait être élaboré afin de déterminer et d'allouer les fonds de fonctionnement lorsque d'importants investissements en capital sont faits.

Le laboratoire TRIUMF offre une infrastructure cruciale à l'ensemble de la communauté canadienne de physique subatomique, tout en exploitant l'un des meilleurs complexes mondiaux d'accélérateurs d'isotopes radioactifs. Par ailleurs, la majeure partie des chercheurs en physique subatomique au Canada sont rattachés à des universités et les capacités techniques locales prises en charge par les programmes AIM/ARM du CRSNG assurent une aide précieuse en leur permettant d'occuper des postes de premier plan en physique subatomique. Nos deux recommandations finales reconnaissent cette double nature du soutien de l'infrastructure au Canada :

Recommandation stratégique : Il y a lieu de favoriser et de renforcer le rôle central du laboratoire TRIUMF qui constitue l'infrastructure et le pivot de la physique subatomique au Canada, en accordant une attention particulière à la transparence du processus budgétaire fédéral, et à la façon dont le budget reflète le mandat de TRIUMF et le plan quinquennal. Pour mener à bien sa mission, TRIUMF devrait être en mesure d'avoir accès à tous les organismes de financement pertinents de la physique subatomique, y compris la FCI.

Recommandation stratégique : Il y a lieu de se pencher étroitement sur les lignes directrices du CRSNG relatives à l'infrastructure (ARM) pour faire en sorte que l'infrastructure de la physique subatomique continue à être admissible au financement, et de veiller à ce que l'infrastructure soit gérée de façon à garantir l'accès sans entrave du milieu canadien de la physique subatomique dans son ensemble.

La physique subatomique est à l'aube d'une ère passionnante, et peu d'années s'écouleront avant que l'on fasse des découvertes vraiment révolutionnaires : de nouvelles dimensions, la matière noire, les théories unifiées. La physique subatomique canadienne est bien placée pour jouer un rôle clé dans cette ère nouvelle. Nous pensons que la mise en œuvre des recommandations formulées dans ce plan nous permettra, d'ici cinq ans, d'être à la fine pointe de cette révolution, d'être reconnus comme des leaders au Canada et d'être activement recherchés comme partenaires scientifiques à l'étranger, car nous n'aurons de cesse de poursuivre notre quête aussi ancienne que l'humanité pour comprendre l'essence même du monde qui nous entoure.



9 Annexes

9.1 Plan à long terme : mandat, procédure et Comité

Plan à long terme en physique subatomique

Composition du Comité :

Le Comité sera composé d'experts représentant les principaux sous groupes appuyés par le Comité de sélection des subventions. Il s'agit des sous groupes suivants : théorie, physique nucléaire (y compris l'astrophysique nucléaire), physique des hautes énergies, physique des neutrinos, astrophysique des particules. Le président sera un chercheur canadien chevronné ayant une bonne vision d'ensemble de la physique subatomique au Canada. On prévoit qu'il y aura un certain recoupement dans la composition de ce comité avec celle de l'actuel CSS, et avec la composition du comité de planification précédent.

Mandat :

Le Comité préparera un énoncé de perspectives pour la physique subatomique au Canada, allant jusqu'à 2016. Ce document présentera au CRSNG et au Comité de sélection des subventions (CSS) en physique subatomique les priorités de la physique subatomique canadienne à l'égard des projets actuels et futurs. L'énoncé doit s'appuyer sur la science réalisée par les physiciens, et mettre l'accent sur les objectifs scientifiques.

9 Annexes

9.1 Plan à long terme : mandat, procédure et Comité

Plan à long terme en physique subatomique

Composition du Comité :

Le Comité sera composé d'experts représentant les principaux sous groupes appuyés par le Comité de sélection des subventions. Il s'agit des sous groupes suivants : théorie, physique nucléaire (y compris l'astrophysique nucléaire), physique des hautes énergies, physique des neutrinos, astrophysique des particules. Le président sera un chercheur canadien chevronné ayant une bonne vision d'ensemble de la physique subatomique au Canada. On prévoit qu'il y aura un certain recoupement dans la composition de ce comité avec celle de l'actuel CSS, et avec la composition du comité de planification précédent.

Mandat :

Le Comité préparera un énoncé de perspectives pour la physique subatomique au Canada, allant jusqu'à 2016. Ce document présentera au CRSNG et au Comité de sélection des subventions (CSS) en physique subatomique les priorités de la physique subatomique canadienne à l'égard des projets actuels et futurs. L'énoncé doit s'appuyer sur la science réalisée par les physiciens, et mettre l'accent sur les objectifs scientifiques.

Le plan doit être préparé en consultation avec l'ensemble de la communauté canadienne en physique subatomique, et avec les groupes qui la représentent. On prévoit que les cinq premières années du plan (de 2006 à 2011) seront décrites plus en détail que la deuxième partie (de 2011 à 2016). On prévoit également que le plan sera réexaminé à la fin de la première période de cinq ans.

Le rapport devrait tenir compte de trois scénarios budgétaires :

1. statu quo (les augmentations suivent plus ou moins le taux d'inflation, mais non davantage);
2. augmentation appréciable du financement accordé à la discipline, reposant sur l'hypothèse d'un doublement du budget du CRSNG pendant la période de 10 ans visée par le plan;
3. réduction appréciable du financement alloué à la discipline, reposant sur l'hypothèse d'une réduction de 20 % du budget du CRSNG pendant les 10 années visées par le plan.

Pour chacun des scénarios ci-dessus, le plan doit aborder expressément les aspects suivants :

- comment optimiser le soutien au programme actuel;
- comment optimiser l'intégration de nouvelles initiatives dans le programme.

Le rapport doit également tenir compte des éléments suivants :

- le rôle de TRIUMF;
- le rôle de la théorie;
- la relation entre le CRSNG et les autres organismes qui appuient la physique subatomique au Canada (y compris, sans toutefois s'y limiter, TRIUMF, le CNRC, la Fondation canadienne pour l'innovation et les universités);
- l'équilibre fragile entre les investissements en capital et les fonds de fonctionnement à même l'enveloppe du CRSNG en physique subatomique.

Le rapport devrait s'adresser avant tout au CRSNG, mais le Comité est encouragé à s'adresser à d'autres parties le cas échéant. Le rapport sera un document public.

Processus :

Le plan devrait être élaboré par la communauté canadienne de physique subatomique, le CRSNG agissant comme observateur et ressource. Le Comité demandera aux diverses parties intéressées de présenter des mémoires et de participer au processus. On doit s'assurer que le processus est ouvert, et que tous les membres de la communauté de physique subatomique peuvent y participer.

Le Comité recevra un soutien financier du CRSNG, couvrant la tenue de réunions dans le cadre des travaux préparatoires, les frais de déplacement des membres du Comité pour assister à ces réunions et la préparation du rapport.

Le plan doit être préparé en consultation avec l'ensemble de la communauté canadienne en physique subatomique, et avec les groupes qui la représentent. On prévoit que les cinq premières années du plan (de 2006 à 2011) seront décrites plus en détail que la deuxième partie (de 2011 à 2016). On prévoit également que le plan sera réexaminé à la fin de la première période de cinq ans.

Le rapport devrait tenir compte de trois scénarios budgétaires :

1. statu quo (les augmentations suivent plus ou moins le taux d'inflation, mais non davantage);
2. augmentation appréciable du financement accordé à la discipline, reposant sur l'hypothèse d'un doublement du budget du CRSNG pendant la période de 10 ans visée par le plan;
3. réduction appréciable du financement alloué à la discipline, reposant sur l'hypothèse d'une réduction de 20 % du budget du CRSNG pendant les 10 années visées par le plan.

Pour chacun des scénarios ci-dessus, le plan doit aborder expressément les aspects suivants :

- comment optimiser le soutien au programme actuel;
- comment optimiser l'intégration de nouvelles initiatives dans le programme.

Le rapport doit également tenir compte des éléments suivants :

- le rôle de TRIUMF;
- le rôle de la théorie;
- la relation entre le CRSNG et les autres organismes qui appuient la physique subatomique au Canada (y compris, sans toutefois s'y limiter, TRIUMF, le CNRC, la Fondation canadienne pour l'innovation et les universités);
- l'équilibre fragile entre les investissements en capital et les fonds de fonctionnement à même l'enveloppe du CRSNG en physique subatomique.

Le rapport devrait s'adresser avant tout au CRSNG, mais le Comité est encouragé à s'adresser à d'autres parties le cas échéant. Le rapport sera un document public.

Processus :

Le plan devrait être élaboré par la communauté canadienne de physique subatomique, le CRSNG agissant comme observateur et ressource. Le Comité demandera aux diverses parties intéressées de présenter des mémoires et de participer au processus. On doit s'assurer que le processus est ouvert, et que tous les membres de la communauté de physique subatomique peuvent y participer.

Le Comité recevra un soutien financier du CRSNG, couvrant la tenue de réunions dans le cadre des travaux préparatoires, les frais de déplacement des membres du Comité pour assister à ces réunions et la préparation du rapport.

Procédure

Le Comité de planification à long terme s'est réuni le 12 août 2005 à Ottawa, pour décider de la marche à suivre afin d'obtenir la participation de la communauté des physiciens au processus de planification. Peu après, le Comité a invité les parties intéressées à présenter leurs commentaires et des mémoires au sujet de leur vision à long terme pour la physique subatomique au Canada. Cinq mémoires avaient été reçus en novembre 2005, dont les titres figurent à la section 9.2.

Une réunion publique, à laquelle ont participé environ 120 physiciens de toutes les régions du Canada, a eu lieu à l'Université McGill, à Montréal, les 5 et 6 décembre 2005. À cette occasion, les mémoires ont été présentés aux physiciens et des discussions ouvertes ont porté sur une foule de sujets.

Les membres du Comité se sont ensuite réunis deux fois, soit du 8 au 10 janvier 2006 à TRIUMF, et les 1er et 2 mai 2006 à Ottawa. En outre, de nombreuses téléconférences ont été tenues tout au long du processus.

Membres du Comité

S. Bhadra York University
M. Butler St. Mary's University
J. Dilling TRIUMF
S. Godfrey Carleton University
C. Hearty University of British Columbia
G. Huber University of Regina
R. McPherson University of Victoria
T. Noble Queen's University
J. M. Poutissou TRIUMF (membre d'office)
K.J. Ragan Université McGill (président)
D. Sinclair Carleton University (membre d'office)
C. Svensson University of Guelph
W. Trischuk University of Toronto (membre d'office)
K. Wilson FCI (membre d'office)

9.2 Références

Le présent rapport et l'information de fond sont affichés dans le site Web **http://www.ap.smu.ca/lrp/**. Les lecteurs intéressés pourront trouver des renseignements plus détaillés en consultant les sites Web ci-dessous.

Commentaires reçus des divers segments de la physique canadienne pour la préparation du présent document :

1. Rapport de la Division de la physique nucléaire de l'Association canadienne des physiciens :
   http://argus.phys.uregina.ca/drupal/dnp/?q=node/24

2. Rapport de l'Institut de physique des particules :
   http://www.ipp.ca/ipp_lrp2005.pdf

3. Rapport des chercheurs du SNOLab :
   http://www.ap.smu.ca/lrp/SNOLAB LRP Brief Final.pdf

4. Rapport des théoriciens :
   http://www.ap.smu.ca/lrp/theoryplan.pdf

5. Mémoire sur les ressources computationnelles en physique subatomique canadienne :
   http://www.ap.smu.ca/lrp/computing_lrp-report.pdf

Autres documents de planification :

1. EP2010, « Physics 2010: An Assessment of and Outlook for Physics », U.S. National Academies, avril 2006 :
   http://www7.nationalacademies.org/bpa/projects_physics 2010.html

2. ECFA EPS (European Committee on Future Accelerators and the European Physics Society). Ces organismes procèdent actuellement à un exercice de planification. Voir :
   http://www.lip.pt/events/2005/hep2005/talks/ecfa_eps.html

3. HEPAP (U.S. DOE/NSF High Energy Physics Advisory Panel), rapport intitulé « The Science Ahead, The Way to Discovery », janvier 2002 :
   http://www.ap.smu.ca/lrp/HEPAP_LRP_web.pdf

4. HEPAP (U.S. DOE/NSF High Energy Physics Advisory Panel), rapport intitulé « The Quantum Universe », octobre 2003 :
   http://www.ap.smu.ca/lrp/Quantum_Universe_GR.pdf

5. NSAC (U.S. DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee), rapport intitulé « Opportunities in Nuclear Science », avril 2002 :
   http://www.ap.smu.ca/lrp/doe.pdf

6. NSAC (U.S. DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee), rapport intitulé « A Vision for Nuclear Theory », novembre 2003 :
   http://arxiv.org/abs/nucl-th/0311056

Documents de fond pour la section traitant des retombées économiques :

1. N. Rosenberg, Research Policy 21 (1992) 381 90.
2. Jerome I. Friedman, professeur de physique au MIT et colauréat du Prix Nobel de physique en 1990, « Will Innovation Flourish in the Future? », publié dans le numéro de décembre 2002 janvier 2003 de The Industrial Physicist. Article disponible en ligne à http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-6/p22.html
3. Paul S. Vincett, président de FairCopy Services, Inc. et ancien président de groupe au CRSNG, Physique, « Review of Canadian Academic Physics : Economic Impact Study », 13 août 1997.
4. Rapport du US Committee on Biomedical Isotopes, Institute of Medicine, National Academy Press 1995.
5. B. Martin, et coll., « The Relationship between Publicly Funded Basic Research and Economic Performance », Science Policy Research Unit, University of Sussex, U.K. (juillet 1996).
6. Bev Robertson, University of Regina et Michael Steinitz, St. Francis Xavier University, « Review of Canadian Academic Physics: Highly Qualified Personnel Study », 1997. Rapport disponible en ligne à http://www.phys.uregina.ca/ugrad/hqp.html

9.3 Glossaire

AIM/ARM	Programmes d'accès aux installations majeures/d'appui aux ressources majeures (CRNSG)
ATLAS	« A Toroidal LHC Apparatus »; un des deux principaux détecteurs du LHC
CANARIE	Organisation vouée au développement de l'Internet avancé au Canada
CDF	Collider Detector Facility; expérience réalisée à l'accélérateur Tevatron, à Fermilab
CDMS	Cryogenic Dark Matter Search, recherche de la matière noire par détecteur cryogène
CDQ	Chromodynamique quantique
CERN	Centre européen de recherches nucléaires (Genève, Suisse)
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CRC	Chaires de recherche Canada
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie
CSS	Comité de sélection des subventions (CRSNG)
DEAP	Dark matter Experiment using Argon Pulse shapes; expérience de recherche de la matière noire utilisant les formes d'impulsion de l'argon
DRAGON	Detector of Recoils And Gammas Of Nuclear Reactions; expérience au laboratoire ISAC
EMMA	ElectroMagnetic Mass Analyzer; expérience au laboratoire ISAC II
FCI	Fondation canadienne pour l'innovation
GEGPIS	Groupe d'experts chargé de l'examen des grands projets d'investissements scientifiques
HERA	Hadron Electron Ring Accelerator; accélérateur au laboratoire DESY, à Hambourg (Allemagne)
ILC	International Linear Collider; collisionneur linéaire international
IPP	Institut de physique des particules
ISAC	Isotope Separator and Accelerator Complex, (laboratoire de TRIUMF)
JLab	Thomas Jefferson National Accelerator Laboratory (Newport News, Virginie, États Unis)
J-PARC	Japanese Proton Accelerator Research Complex (Tokai, Japon)

LEP	Large Electron Positron Collider; grand collisionneur électrons positrons au CERN, qui a été en service de 1989 à 2000
LHC	Large Hadron Collider; grand collisionneur de hadrons (au CERN)
PET	Tomographie par émission de positrons
PHQ	Personnel hautement qualifié
PICASSO	Projet d'identification des candidates supersymétriques de la matière sombre
PLT	Plan à long terme
SAP	Physique subatomique
SM	Modèle standard
SNO	Observatoire de neutrinos de Sudbury
SNOLab	Nouveau laboratoire installé au SNO, dans la mine Creighton d'INCO, près de Sudbury
T2K	Expérience visant à étudier les oscillations de neutrinos entre Tokai et Kamiokande, au Japon
TACTIC	TRIUMF Annular Chamber for Tracking and Identification of Charged Particles; chambre annulaire
Tevatron	Collisionneur protons antiprotons de 2 TeV au Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) près de Chicago.TRIUMF pour le suivi et l'identification des particules chargées
TIGRESS	TRIUMF ISAC Gamma Ray Escape Suppressed Spectrometer
TITAN	TRIUMF Ion Trap for Atomic and Nuclear science; piège ionique pour les sciences atomiques et nucléaires à TRIUMF.
TRINAT	Piège à atomes neutres à TRIUMF
TRIUMF	Tri University Meson Facility; situé sur le campus de l'University of British Columbia à Vancouver, TRIUMF est le laboratoire national canadien en physique des particules et en physique nucléaire
TUDA	TRIUMF U.K. Detector Array; matrice de détecteurs TRIUMF – Grande Bretagne
TWIST	TRIUMF Weak Interaction Symmetry Test; test de symétrie des interactions faibles à TRIUMF
VERITAS	Very Energetic Imaging Telescope Array System
WestGrid	Western Canada Research Grid; réseau informatique de recherche de l'Ouest canadien
WIMPS	Particules massives interagissant faiblement
ZEUS	Détecteur à l'accélérateur HERA, au laboratoire DESY

Crédits photos

© CERN
Couverture, pages 19, 23, 38, 51, 84, 86

Gracieuseté : Collaboration SNO
page 3

Gracieuseté : Jean-François Colonna
page 46

Gracieuseté : DESY, Hambourg
pages 26, 48

Gracieuseté : DESY, Zeuthen
page 8

Gracieuseté : FNAL Visual Media Services
pages 37, 41, 53, 58, 68, 71

Gracieuseté : David Hornidge,
Mount Allison University
pages 42, 65, 80

Gracieuseté : Institut Perimeter
pages 12, 67

Gracieuseté : T. Ishida,
Institut de recherche sur les rayons cosmiques,
Université de Tokyo
Page 33

Gracieuseté : Jefferson Laboratory
page 17, 43, 44, 61

Gracieuseté : KEK
page 4

Gracieuseté : Mohsen Khakzad,
Carleton University
page 75

Gracieuseté : Roy Langstaff,
University of Victoria/TRIUMF
page 39

Gracieuseté : Derek Leinweber, CSSM,
Université d'Adélaïde
page 13

© Luminex
page 62

Gracieuseté : Hitoshi Murayama
page 9

Gracieuseté : Observatoire de Kamioka,
Institut de recherche sur les rayons cosmiques,
Université de Tokyo
page 11

© SNOLab
pages 21, 30, 34, 82

Gracieuseté : Vance Strickland,
Carleton University/TRIUMF
page 81

© TRIUMF
pages 15, 29, 35, 55, 64, 72, 79

Crédits photos

© CERN
Couverture, pages 19, 23, 38, 51, 84, 86

Gracieuseté : Collaboration SNO
page 3

Gracieuseté : Jean-François Colonna
page 46

Gracieuseté : DESY, Hambourg
pages 26, 48

Gracieuseté : DESY, Zeuthen
page 8

Gracieuseté : FNAL Visual Media Services
pages 37, 41, 53, 58, 68, 71

Gracieuseté : David Hornidge,
Mount Allison University
pages 42, 65, 80

Gracieuseté : Institut Perimeter
pages 12, 67

Gracieuseté : T. Ishida,
Institut de recherche sur les rayons cosmiques,
Université de Tokyo
Page 33

Gracieuseté : Jefferson Laboratory
page 17, 43, 44, 61

Gracieuseté : KEK
page 4

Gracieuseté : Mohsen Khakzad,
Carleton University
page 75

Gracieuseté : Roy Langstaff,
University of Victoria/TRIUMF
page 39

Gracieuseté : Derek Leinweber, CSSM,
Université d'Adélaïde
page 13

© Luminex
page 62

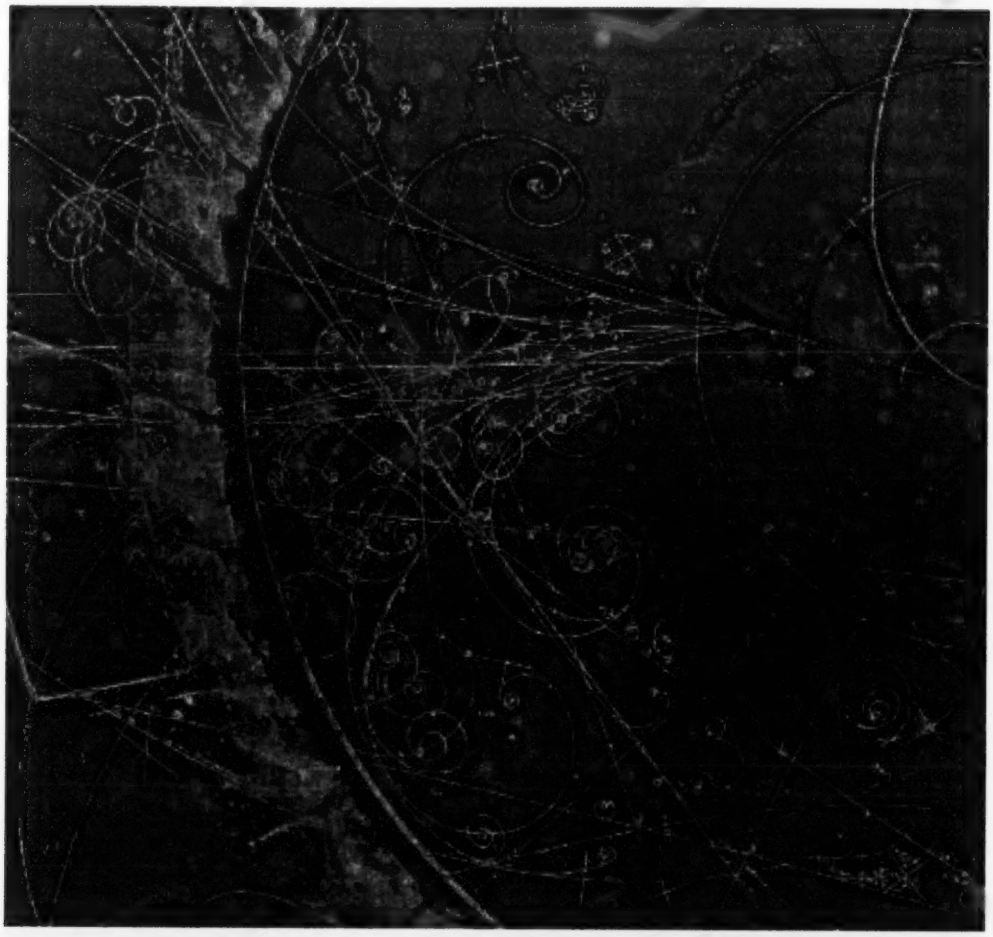
Gracieuseté : Hitoshi Murayama
page 9

Gracieuseté : Observatoire de Kamioka,
Institut de recherche sur les rayons cosmiques,
Université de Tokyo
page 11

© SNOLab
pages 21, 30, 34, 82

Gracieuseté : Vance Strickland,
Carleton University/TRIUMF
page 81

© TRIUMF
pages 15, 29, 35, 55, 64, 72, 79



CRSNG
NSERC

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie
350, rue Albert
Ottawa (Ontario)
K1A 1H5
www.crsng.gc.ca

Pour de plus amples informations :

Kenneth Ragan, professeur
McGill University
Président du Comité de planification à long terme de physique subatomique
(514) 398-6518
ragan@physics.mcgill.ca

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada | Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada

Canada